



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Mejoras del transporte neumático de semillas utilizando métodos numéricos de partículas

Treball realitzat per:

Jana Casany Domènech

Dirigit per:

Miguel Angel Celigueta Jordana

Màster en:

**Enginyeria de
Camins, Canals i Ports**

Barcelona, 30/09/2019

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

RESUMEN

En las sembradoras neumáticas, el transporte de semillas se realiza mediante corrientes de aire que circulan a través de mangueras flexibles. Estas sirven de conexión entre la tolva y los elementos distribuidores, y de allí a las unidades de siembra. Uno de los componentes clave para lograr una repartición uniforme de semillas en las diferentes mangueras de salida, y por lo tanto una buena siembra, es el elemento distribuidor.

El objetivo de la tesina, partiendo de la geometría de referencia de un elemento distribuidor proporcionada por una marca comercial, es el de encontrar un diseño alternativo al actual con el que se obtenga una distribución mejor de semillas en las salidas; únicamente variando la geometría del conducto, manteniendo el cabezal superior igual.

En el presente documento se analiza el comportamiento de la corriente de aire con las semillas en el interior del elemento de mediante simulaciones numéricas empleando métodos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para la modelización del aire, y DEM (*Discrete Element Method*) para las semillas. El software utilizado es el GiD con dos de los módulos de *Kratos Multiphysics*: *Fluid Dynamics Application* y *Swimming DEM application*; todo ello desarrollado por CIMNE. El cual ha permitido un conocimiento muy profundo de la dinámica producida en el interior del elemento, mostrando la potencia y versatilidad de las simulaciones numéricas actuales.

A partir de los resultados obtenidos se proponen y analizan tres geometrías diferentes, concluyendo que la geometría del conducto tiene un efecto importante en la distribución de velocidades en su interior.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Miguel Angel Celigueta por haberme guiado y ayudado durante el transcurso de esta tesina, que sin sus consejos y aportaciones no hubiera sido posible.

Gracias a mis amigos y compañeros de la universidad por apoyarnos entre nosotros en los momentos difíciles, y a su vez, permitir la desconexión momentánea del presente documento.

Finalmente doy las gracias a mi familia por haberme apoyado siempre a seguir adelante hasta cumplir mis sueños.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.1. INTRODUCCIÓN	7
1.2. OBJETIVOS	8
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	9
2.1. INTRODUCCIÓN	9
2.2. MÁQUINAS SEMBRADORAS	9
2.2.1. Sembradoras neumáticas a chorrillo	10
2.2.2. Modelos elementos distribuidores actuales	12
2.2.3. Conclusiones	16
2.3. ESTUDIOS PREVIOS	16
2.4. HERRAMIENTAS NUMÉRICAS. TEORÍA CFD-DEM	18
2.4.1. Descripción general	19
2.4.2. Formulación CFD	20
2.4.3. Formulación DEM	22
2.4.4. Formulación CFD-DEM	24
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS	26
3.1. INTRODUCCIÓN	26
3.2. METODOLOGÍA	26

3.1.1. Geometría.....	27
3.1.2. Condiciones de contorno	29
3.1.3. Mallado.....	31
3.1.4. Paso de tiempo.....	34
3.2. RESULTADOS	35
3.2.1. CFD, sólo fluido sin partículas	35
3.2.2. CFD-DEM, con partículas	42
CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE ALTERNATIVAS AL DISEÑO ACTUAL	61
4.1. INTRODUCCIÓN	61
4.2. MODELO “MICHELIN”	61
4.2.1. Geometría	62
4.2.2. Resultados	62
4.2.3. Conclusiones.....	68
4.3. MODELO “MONGETA”	69
4.3.1. Geometría	69
4.3.2. Resultados	70
4.3.3. Conclusiones.....	76
4.4. MODELO “QUESTION MARK”	77
4.4.1. Geometría	77
4.4.2. Resultados	78
4.4.3. Conclusiones.....	83
4.5. CONCLUSIONES	84
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	86
5.1. CONCLUSIONES	86
5.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un sistema neumático de sembradora a chorrillo.	11
Figura 2. Partes de una sembradora neumática a chorrillo.	11
Figura 3. Máquina sembradora Solà.....	12
Figura 4. Máquina sembradora Sulky, modelo compacto.....	13
Figura 5. Máquina sembradora Sulky, modelo separado.....	13
Figura 6. Sección cabezal distribuidor Sulky.....	14
Figura 7. Modelos cabezales distribuidores Amazone.	14
Figura 8. Maquina sembradora Amazone, modelo dos cabezales.	15
Figura 9. Máquina sembradora Amazone, modelo curvo.	15
Figura 10. Máquina sembradora Amazone, modelo compacto.	16
Figura 11. Modelo simple contacto partículas. Resorte-amortiguador.	23
Figura 12. Esquema básico del elemento distribuidor.	27
Figura 13. Alzado del elemento (cm).....	28
Figura 3. Alzado, detalle ondulaciones (cm).....	28
Figura 4. Vista en planta del elemento (cm).....	29
Figura 16. Esquema condiciones de contorno.....	31
Figura 17. Esquema de tamaños de mallado según la zona del elemento.....	32
Figura 18. Zoom de la capa límite en una sección.....	32
Figura 19. Mallado general del elemento.	33
Figura 20. Representación del mallado en secciones.....	33
Figura 21. Distribución de velocidades en la sección vertical representativa. Modelo de referencia.	36
Figura 22. Distribución de velocidades en el cabezal superior. Modelo de referencia.	37
Figura 23. Distribución de velocidades en dos secciones verticales principales. Modelo de referencia. ...	38
Figura 24. Esquema de secciones transversales para el análisis. Modelo de referencia.	39
Figura 25. Distribución velocidades en secciones transversales mitad inferior. Modelo de referencia. ...	40
Figura 26. Distribución velocidades en secciones transversales mitad superior. Modelo de referencia....	41
Figura 27. Entrada partículas al sistema con sus velocidades.	42
Figura 28. Distribución y velocidades de partículas entre $t=0.005s$ y $t=0.055s$	43
Figura 29. Distribución y velocidades de partículas entre $t=0.075s$ y $t=2.00s$	44
Figura 30. Distribución y velocidad de las partículas en el tramo horizontal.	45

Figura 31. Distribución y velocidad de las partículas en el codo de 90°.....	46
Figura 32. Distribución y velocidad de las partículas en el ensanchamiento.	48
Figura 33. Distribución y velocidad de las partículas en la primera mitad del tramo con ondulaciones. ...	49
Figura 34. Distribución y velocidad de las partículas en la segunda mitad del tramo con ondulaciones. .	50
Figura 35. Distribución y velocidad de las partículas en la segunda mitad del tramo con ondulaciones. .	52
Figura 36. Distribución velocidades y trayectoria seguida por las partículas en secciones principales.	53
Figura 37. Velocidades y trayectoria partículas primera mitad elemento. Corriente principal.	53
Figura 38. Velocidades y trayectoria partículas primera mitad elemento. Descenso partículas.	54
Figura 39. Velocidades y trayectoria partículas tramo vertical con ondulaciones. Corriente principal.	54
Figura 40. Velocidades y trayectoria partículas en tramo vertical con ondulaciones. Zona turbulencias. .	55
Figura 41. Velocidades y trayectoria partículas en cabezal distribuidor. Corriente principal.	55
Figura 42. Velocidades y trayectoria partículas en cabezal distribuidor. Salida de partículas.	56
Figura 43. Velocidades y trayectoria partículas en cabezal distribuidor. Zona turbulencias.	56
Figura 44. Esquema de numeración de las salidas del cabezal distribuidor.....	57
Figura 45. Geometría del modelo "Michelin".	62
Figura 46. Distribución de velocidades en la sección principal representativa. Modelo "Michelin".	63
Figura 47. Distribución de velocidades en el cabezal superior. Modelo "Michelin".	64
Figura 48. Distribución de velocidades en las dos secciones verticales principales. Modelo "Michelin". .	65
Figura 49. Esquema secciones de estudio. Modelo "Michelin".	66
Figura 50. Distribución velocidades en secciones mitad inferior. Modelo "Michelin".	67
Figura 51. Distribución velocidades en secciones mitad superior. Modelo "Michelin".	68
Figura 52. Geometría del modelo "Mongeta".	70
Figura 53. Distribución de velocidades en la sección principal representativa. Modelo "Mongeta"	71
Figura 54. Distribución de velocidades en el cabezal superior. Modelo "Mongeta".	72
Figura 55. Distribución de velocidades en las dos secciones verticales principales. Modelo "Mongeta". .	73
Figura 56. Esquema secciones de estudio. Modelo "Mongeta".....	74
Figura 57. Distribución velocidades en secciones mitad inferior. Modelo "Mongeta".....	75
Figura 58. Distribución velocidades en secciones mitad superior. Modelo "Mongeta".	76
Figura 59. Geometría del modelo "Question Mark".	77
Figura 60. Distribución velocidades en la sección principal representativa. Modelo "Question mark". ...	78
Figura 61. Distribución de velocidades en el cabezal superior. Modelo "Question Mark".	79
Figura 62. Distribución velocidades en secciones verticales representativas. Modelo "Question Mark".	81
Figura 63. Esquema de secciones transversales para el análisis. Modelo "Question mark".....	81
Figura 64. Distribución velocidades secciones transversales mitad inferior. Modelo "Question Mark". ...	82
Figura 65. Distribución velocidades secciones transversales mitad superior. Modelo "Question mark".	83

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Vivimos en una sociedad evolutiva, en que ciencia y tecnología están cada vez más presentes en la vida diaria. Cada vez son más y diferentes los campos de aplicación de la técnica permitiendo de este modo la modernización y optimización de procesos que tradicionalmente se habían desempeñado sin la máxima productividad.

Evidentemente este progreso se ha extendido en todos los ámbitos llegando incluso a la agricultura, dónde la empresa agraria busca obtener el máximo beneficio posible en su producción. Al tener poco margen de negociación por lo que respeta a las materias primas y al producto obtenido, la diferencia de beneficio vendrá dada por la correcta elección de la técnica de cultivo y la maquinaria usada, siendo el proceso de siembra uno de los más importantes para garantizar una buena plantación del cultivo y por lo tanto, maximizar los beneficios.

Actualmente existen máquinas en el mercado capaces de realizar la siembra de semillas de una forma más ágil y compacta sin la necesidad de preparar el terreno previamente. Este documento se centrará en las máquinas sembradoras neumáticas a chorrillo, las cuales disponen de una tolva que contiene las semillas, conectada a la unidad sembradora a través de mangueras y elementos distribuidores. Así, las semillas son transportadas por una corriente de aire a gran velocidad por el interior de los conductos de forma bastante ordenada, pero pudiendo llegar al desorden y a la aparición de posibles turbulencias en algún punto del recorrido debido a la variación de la geometría en el conducto.

Para la correcta siembra, las semillas se deben disponer a la profundidad adecuada de tal modo que se garantice un buen contacto con el terreno que las rodea. Además, se debe hacer distribuyendo un número similar de semillas por unidad de longitud en cada unidad de sembrado, para conseguir un resultado homogéneo. De este modo, los elementos distribuidores

juegan un papel muy importante, ya que son los encargados de distribuir las partículas hacia las mangueras que conectan con cada una de las unidades de sembrado, razón por la cual las empresas que comercializan con este tipo de sembradoras investigan para intentar cumplir estos objetivos. De esta manera, se hacen numerosos ensayos experimentales con el fin de determinar la mejor forma de estos elementos distribuidores y poder liderar el mercado. No obstante, estos suelen ser muy caros y lentos ya que involucra el diseño y la fabricación del cabezal a testar.

Por este motivo, y con el actual desarrollo que están teniendo los métodos numéricos, algunas de las grandes empresas, se han planteado la posibilidad de estudiar este problema a partir de simulaciones numéricas que sean capaces de modelar el elemento distribuidor, juntamente con el aire y las semillas que intervienen en su interior.

Así, con los avances de la ingeniería en cuanto a modelización numérica y a la mayor capacidad de los ordenadores frente al cálculo, este resulta un problema con múltiples soluciones.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesina es el de encontrar un diseño del elemento distribuidor con el que se obtengan mejores resultados que el proporcionado por una marca comercial. De forma que resulte una distribución uniforme de las partículas en las mangueras de salida; ya que el fabricante ha observado, mediante su experiencia, que las partículas tienden a salir más por las mangueras frontales del elemento. Así, se podría llegar a lograr un sembrado homogéneo en el terreno y dar solución a las empresas comerciantes, dando la posibilidad de ampliar su mercado.

Para llegar a este fin hay diferentes componentes y parámetros que pueden influir en el resultado. Este documento solamente se ha centrado en la mejora modificando la geometría del conducto del elemento distribuidor, ya que podría tratarse de la parte más importante para obtener una distribución uniforme de semillas en las mangueras de salida, manteniendo el cabezal circular superior intacto.

No obstante, primero se tienen que entender que fenómenos hacen funcionar mejor o peor el elemento distribuidor conociendo el comportamiento del aire y semillas en su interior. Tratándose así de un problema de dinámica de fluidos computacional (CFD), juntamente con el método de elementos discretos (DEM) para la introducción de las semillas. De este modo, se usa el software GiD con dos de los módulos de *Kratos Multiphysics: Fluid Dynamics Application* y *Swimming DEM application*; todo ello desarrollado por CIMNE.

CAPÍTULO 2:

ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se hace una introducción a las diferentes tipologías de máquinas sembradoras, centrándose principalmente con la neumática a chorrillo. Seguidamente se muestran sus partes principales y se explica brevemente el funcionamiento del elemento distribuidor de semillas.

Posteriormente, se comparan diferentes modelos de elementos distribuidores usados por tres fabricantes distintos para ver que partes son similares, cuales cambian y como, etc.

Se continua con las principales conclusiones que llegaron diferentes autores en otros estudios relacionados con el modelo numérico y experimental del elemento distribuidor, como también con el efecto que genera la geometría.

Finalmente se describen las herramientas para el cálculo numérico del problema fluido-partículas (CFD-DEM), y su formulación.

2.2. MÁQUINAS SEMBRADORAS

Las máquinas sembradoras que se encuentran hoy en día en el mercado de gama alta son capaces de conseguir un proceso de sembrado mucho más rápido, mejor y más eficiente en términos de recursos. Esto es debido a que se han convertido en maquinaria agraria capaces de realizar todos los procesos necesarios para la siembra de semillas.

Este sistema de siembra se conoce como directo o de mínima labranza, diferenciándose del tradicional en que no es necesaria la preparación previa del terreno, sino que la misma máquina lo hace todo. De esta manera, empiezan por la apertura de los surcos en el terreno, siguen con

la dispensación de las semillas y acaban con el tapado de la zanja, todo este proceso se realiza en una única pasada con una sola máquina.

Los componentes principales de este tipo de maquinaria son la tolva, donde se encuentran las semillas, los dosificadores que regulan la cantidad de material que se desea aplicar y los distribuidores que son los encargados de introducir las semillas en el terreno.

Otra clasificación se hace según el volumen de siembra capaz de cubrir y la forma de dosificación de las semillas en la tierra. Habitualmente, la siembra se realiza en líneas por lo que la tipología más usada son las sembradoras a chorrillo y las monograno. Dependiendo del mecanismo de dosificación y distribución se pueden distinguir entre mecánicas y neumáticas.

2.2.1. Sembradoras neumáticas a chorrillo

El estudio realizado en este documento solamente abarca las sembradoras neumáticas a chorrillo las cuales corresponden a un sistema de siembra directa, por lo que a partir de ahora se centrará únicamente en esta tipología de maquinaria.

2.2.1.1. Breve descripción

Las características básicas de estas máquinas es que permiten insertar sobre cada línea de siembra una cantidad de grano determinado, resultando líneas de siembra equiespaciadas entre sí de unos 12 y 20 cm, y anchuras de trabajo muy amplias, entre 3 y 8 metros. Resultando una gran homogeneidad y densidad de plantas en el sembrado. La dosificación y distribución de las semillas se realiza mediante unidades distribuidoras o conductos de caída, dependiendo de la tipología de granos y su tamaño.

Normalmente, estas sembradoras suelen estar divididas en dos unidades separadas que son arrastradas por un tractor, las cuales se podrían usar de forma independiente combinando con otras. De este modo, se podría distinguir entre la unidad de carro o tanque donde se almacenan y se dosifican las semillas, y la unidad sembradora que se encarga de distribuir y depositar las semillas en el terreno. Para permitir el paso de semillas entre una unidad y la otra, se utilizan mangueras en donde las semillas son impulsadas por la corriente de aire a gran velocidad que produce una bomba de aire.

2.2.1.2. Partes y funcionamiento de la maquinaria

Tal y como se muestra en la *figuras 1 y 2* el primer elemento relevante se trata de la tolva (1) en la cual se almacenan las semillas a plantar. En el inferior de la tolva, se encuentran los dosificadores (2) de tipo mecánico que permitan la regulación de la cuantía de semillas a

emplear. Posteriormente, las semillas se mezclan con la corriente de aire generada por la bomba de aire (4) en la camara de mezclado (3), la cual se conecta con la manguera de transporte (5) que suele ser flexible, hasta llegar al elemento que se encargará de distribución de semillas.

Este elemento es el objeto de estudio de este documento, el cual está formado por un codo (6) que proporciona una entrada vertical necesaria para la posterior distribución de las semillas. Seguidamente, se encuentra el tubo de guiado vertical (7) con ciertas ondulaciones con el objetivo de conseguir un flujo uniforme en toda la sección para la entrada en el cabezal distribuidor (8), el cual también varía su geometría en función de conseguir una repartición uniforme en los tubos de salida (9). Finalmente, estos tubos son los que conducen las semillas hasta las diferentes unidades de sembrado (10) que hacen los surcos a la profundidad fijada y depositan las semillas en el terreno. Además, también se pueden encontrar otros elementos complementarios como los borra-huellas (11).

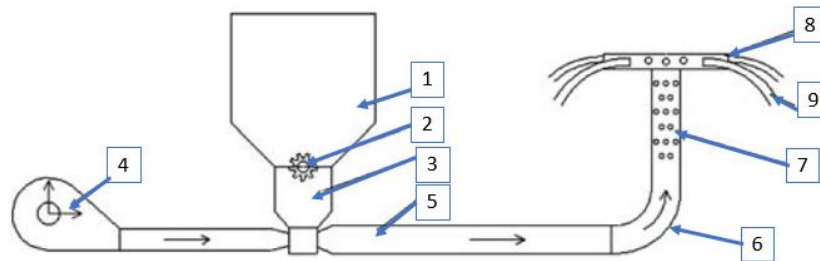


Figura 1. Esquema de un sistema neumático de sembradora a chorrillo.

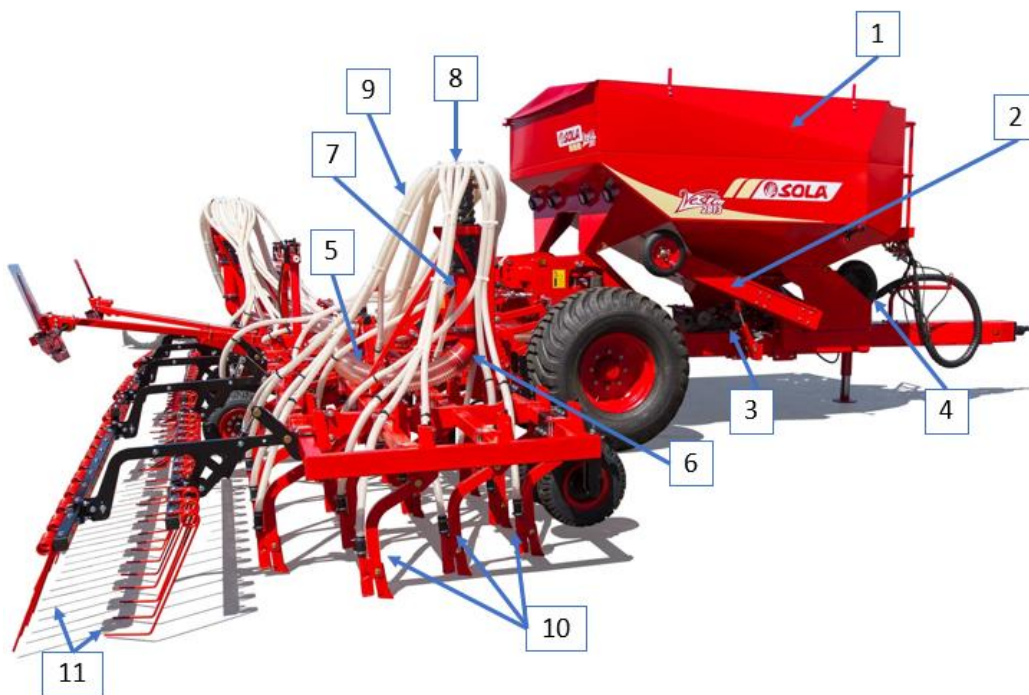


Figura 2. Partes de una sembradora neumática a chorrillo.

2.2.2. Modelos elementos distribuidores actuales

Tal y como se ha dicho, uno de los elementos más importantes de esta tipología de máquinas que distingue entre un buen sembrado y no, es la forma del elemento distribuidor de semillas compuesto por el cabezal distribuidor, juntamente con el conducto vertical y el codo. De este modo, cada una de las empresas han adquirido su propio diseño para intentar lograr una distribución lo más uniforme posible en las mangueras de salida del cabezal.

En este apartado se analizarán los diferentes modelos de estos elementos de las principales marcas de este sector, como son *Solà*, *Amazone* y *Sulky*.

2.2.2.1. Modelos Solà

La primera empresa analizada es la de Solà, la cual es una empresa catalana ubicada en la población de Calaf en la provincia de Barcelona, y se trata de una de las más importantes en España.

En la *figura 3* se muestra el modelo del elemento distribuidor que dispone la empresa Solà. Se observa que está compuesto por un codo con un giro de 90 grados, un tubo de guiado con una primera parte lisa y rígida, seguida por una segunda parte con ondulaciones. En cuanto a la geometría del cabezal distribuidor, esta es circular y con la parte superior plana.



Figura 3. Máquina sembradora Solà.

2.2.2.2. Modelos Sulky

Otra de las empresas importantes que fabrican esta tipología de máquinas es la francesa Sulky, fundada en 1936.

Disponen de varias sembradoras neumáticas a chorrillo, pero se pueden diferenciar dos tipologías diferentes de elementos distribuidores dependiendo de si la tolva se encuentra junto a él o no. No obstante, el cabezal distribuidor es el mismo en los dos casos, solamente varía el trazado del conducto desde la tolva hasta éste.

En la *figura 4* se puede observar el caso en que ambas partes son tiradas por el tractor. En este caso, para pasar de una orientación horizontal a una vertical del conducto se hace con un primer giro de aproximadamente 90° , con cierta inclinación horizontal, seguida del segundo giro de unos 120° . De esta manera, se llega a alcanzar el tubo de guiado compuesto por una primera parte lisa y una segunda con pequeñas ondulaciones.

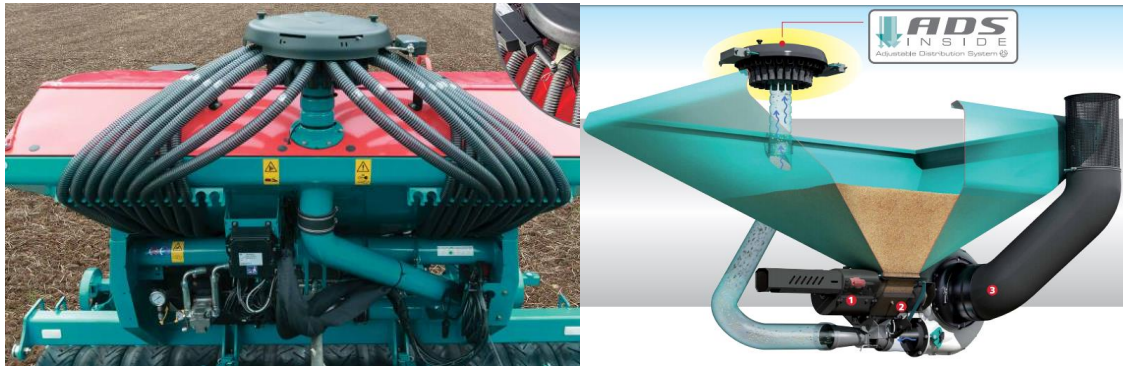


Figura 4. Máquina sembradora Sulky, modelo compacto.

Por otro lado, también existe el caso de tener las dos unidades separadas, es decir, el tractor tira de la unidad de sembrado mientras que empuja de la tolva. La solución para el elemento distribuidor propuesta consiste en un giro de 90° seguido por el tubo de guiado con una pequeña parte lisa y otra con ondulaciones, tal y como se muestra en la *figura 5*.



Figura 5. Máquina sembradora Sulky, modelo separado.

Como se ha dicho anteriormente, se el cabezal distribuidor de los modelos de máquinas son el mismo. Este es circular y con la parte superior plana. En la sección que se muestra en la *figura 6* se puede observar, que cada uno de los conductos dispone de como unas aletas que permiten al usuario modificar fácilmente el número de mangueras de salida abiertas/cerradas; y por lo tanto el control de la cantidad de hileras plantadas.

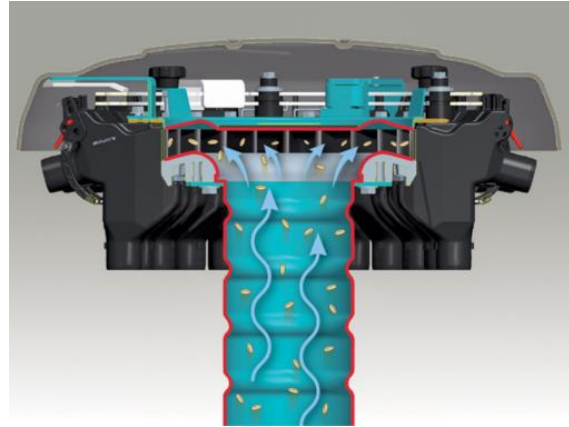


Figura 6. Sección cabezal distribuidor Sulky.

2.2.2.3. Modelos Amazone

La empresa Amazone corresponde a una de las más antiguas y reconocidas a nivel mundial, fundada en 1883 en Alemania.

Esta dispone de varios modelos diferentes de máquinas dependiendo de la superficie a sembrar, capacidad de la tolva, espaciado entre hileras, tipo de terreno, velocidad de siembra, etc. En que los elementos distribuidores varían ligeramente.

Este fabricante opta por el uso de cabezales distribuidores translúcidos ya que estos permiten la supervisión permanente del flujo de semillas, por lo tanto, se encuentran fuera de la tolva para estar a la vista del operador. En la *figura 7* se puede observar que hay dos tipologías diferentes, una con la parte superior más plana y otra con más volumen. Estos son capaces de cerrar algunas de las mangueras de salida, dependiendo del modelo.



Figura 7. Modelos cabezales distribuidores Amazone.

A continuación se mostraran algunas de las máquinas sembradoras para observar el conjunto del elemento distribuidor.

En el modelo de máquina sembradora de la *figura 8* se puede observar el elemento distribuidor conectado a la tolva por una manguera horizontal flexible, seguido por un codo rígido con un cambio de 90° buscando la vertical, enlazando con un tramo liso y otro más largo de ondulaciones.



Figura 8. Máquina sembradora Amazone, modelo dos cabezales.

También se encuentran modelos en los que el giro no se hace en un ángulo recto, sino que está compuesto por dos codos unidos, quedando una forma parecida a la de un sifón, como se muestra en la *figura 9*. Al llegar al tramo vertical en estos casos también se encuentra una primera parte lisa seguida por otra con ondulaciones.



Figura 9. Máquina sembradora Amazone, modelo curvo.

Por último, existen máquinas en las que el elemento distribuidor va junto a la tolva y el recorrido del conducto no forma un ángulo recto ya que tiene cierta inclinación para alcanzar el elemento distribuidor, como se muestra en la *figura 10*. En esta tipología todo el conducto vertical tiene ondulaciones, sin tener la primera parte lisa como en la resta de los casos.



Figura 10. Máquina sembradora Amazone, modelo compacto.

2.2.3. Conclusiones

Una vez comentadas las diferentes tipologías existentes del elemento distribuidor de las máquinas sembradoras de tres marcas reconocidas, se puede decir lo siguiente:

- En todos los modelos vistos siempre hay un tramo vertical, antes del cabezal circular, con ondulaciones en el conducto. Dependiendo de la marca y modelo puede ser más o menos largo, normalmente también se encuentra un tramo liso previo al ondulado.
- La longitud del tubo de guiado vertical es diferente dependiendo de la empresa fabricante. En el caso de Solà y Amazone las longitudes son similares, pero en los de Sulky son considerablemente más cortas.
- Respecto la geometría del cabezal, en todos los casos esta es circular con las mangueras conectadas en todo su perímetro. No obstante, se diferencian en la parte superior ya que en Solà y Sulky es plano, mientras que en Amazone todos tienen un cierto grado de curvatura y son translucidos.
- Para hacer el cambio de dirección del conducto desde la salida de la tolva hasta el tubo de guiado vertical, normalmente se hace con un codo de 90°. No obstante, en los casos en que la tolva y el cabezal distribuidor están muy juntos se suele hacer poniendo un conducto inclinado en medio haciendo el giro más abierto. En el caso de Amazone, algunos modelos hacen como la forma de un sifón, dando más curvatura al conducto.

2.3. ESTUDIOS PREVIOS

La geometría óptima del elemento distribuidor de semillas de las máquinas sembradoras neumáticas ha sido objeto de estudio en varias ocasiones, ya que la distribución de semillas en

las mangueras de salida no es uniforme, provocando una siembra heterogénea. De este modo, a continuación se exponen diferentes conclusiones a las que han llegado en varios estudios que se han hecho, en relación básicamente a la geometría y a la distribución de velocidades y de semillas en el elemento.

Como se ha visto en el apartado anterior, todos los modelos de los elementos distribuidores de las diferentes marcas analizadas tenían una parte con ondulaciones en el tubo de guiado vertical, antes de llegar al cabezal. De este modo, un estudio de *Bourges [2]* investigó si la incorporación de estas ondulaciones o abolladuras en el tubo de guiado vertical del elemento suponía una mejora para la distribución de velocidades del fluido. Finalmente, se concluyó que con el tubo vertical completamente liso, el comportamiento del flujo del aire era mejor respecto a las configuraciones con las ondulaciones. Esto fue debido a que en las simulaciones con ondulaciones aparecían mayores pérdidas de presión, además de tener una mayor dificultad en cuanto a su fabricación. No obstante, se entra en contradictoria con los fabricantes ya que afirman que gracias a las ondulaciones se mejora la uniformidad en la distribución de flujo.

Respecto a la distribución de semillas en la salida del cabezal distribuidor, *Bourges [2]* comparó los resultados experimentales obtenidos en un banco de ensayos con los resultantes de la simulación numérica con condiciones equivalentes. Para el estudio se usó un elemento distribuidor con 6 mangueras de salida y el tubo de guiado vertical completamente liso, con un codo de 90°. En ambos casos se obtuvo que el mayor caudal de partículas se daban en las salidas frontales (donde se encuentra el conducto entrante), quedando las posteriores con un menor caudal. Los resultados obtenidos en este caso sí que coincidían con lo que observaban los fabricantes de esta tipología de elementos. Otro punto importante obtenido en las simulaciones numéricas realizadas para este estudio, fue que el tiempo de residencia de las semillas se incrementaba notablemente al llegar al cabezal distribuidor, debido a la gran cantidad de rebotes que se ocasionaban.

Por otro lado, en cuanto a la distribución de velocidades en el cabezal distribuidor se ha encontrado un estudio de *M. Bayati y C. Johnston [1]* en donde se efectúa la simulación de un elemento distribuidor con un codo de 90°, seguido por el tubo de guiado vertical con ondulaciones en la primera mitad y liso hasta llegar al cabezal con 11 salidas. Como resultado se obtiene un flujo asimétrico en el cabezal, teniendo velocidades superiores en las salidas posteriores. Esto es debido al paso del aire por el codo, ya que el cambio de dirección provoca la aparición de una corriente principal en la pared posterior del conducto vertical. Además, la

longitud del tramo vertical no es suficientemente larga para volver a uniformizar las velocidades en la sección.

Otro artículo interesante que también trata de la distribución de velocidades y de la influencia de la geometría del elemento distribuidor vertical de semillas es el de *Andrii Yatskul, Jean [10]* en el cual se hicieron ensayos experimentales. Se demostró que por cada cabezal y cada densidad de semillas en el fluido, había una velocidad de flujo con la cual se obtenía la mejor distribución de partículas. Además, esta distribución depende básicamente de la sección que se encuentra en el tubo de guiado vertical antes de llegar al cabezal. También resalta la importancia de un tramo lo más recto posible antes de llegar al codo para no generar más perturbaciones de las necesarias. Afirma que la altura del elemento ayuda a la estabilización del flujo pero se requeriría más energía para llevar las partículas a la parte superior. Se añade que cualquier inclinación del elemento generaría efectos desfavorables para la distribución de semillas.

Para entender mejor el comportamiento de las semillas transportadas por la corriente de aire en el interior del elemento, en un estudio realizado por *Bourges, Jorge [2]* se analiza mediante simulaciones numéricas el cabezal distribuidor con un flujo constante y con dos tamaños diferentes de semillas (soja y amaranto). Los resultados obtenidos mostraron que las semillas de amaranto (más pequeñas) seguían mejor la corriente de flujo, dando lugar a un reparto más uniforme en las mangueras de salida. Debido a un menor valor del número de Stokes, implicando una influencia menor en las fuerzas inerciales.

2.4. HERRAMIENTAS NUMÉRICAS. TEORÍA CFD-DEM

Tal y como se ha dicho previamente, para el modelado del problema del cabezal distribuidor se necesita la modelización del aire que entra al sistema con una cierta velocidad (fluido), juntamente con las semillas transportadas por este (partículas).

De este modo, en este apartado se describirá brevemente la dinámica de fluidos computacional (CFD), seguidamente la de partículas (DEM), y posteriormente se mostrará la formulación empleada para esta tipología de modelos de forma separada y conjunta.

Con la alza de estos métodos, actualmente existen diferentes programas que permiten el análisis de CFD-DEM. Para este trabajo se ha utilizado el pre y post procesador GiD juntamente con dos módulos de Kratos Multiphysics: Fluid Dynamics Application (para el cálculo del fluido) y Swimming DEM application (para el cálculo conjunto de partículas y fluido), desarrollado por CIMNE.

2.4.1. Descripción general

2.4.1.1. CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Para la resolución de un problema de mecánica de fluidos con un ordenador, se necesitan unas aproximaciones matemáticas para la simplificación del problema. Esta es la base de los CFD (“Computational Fluid Dynamics”), es decir, de la dinámica computacional de fluidos.

De este modo, se puede decir que los CFD es la rama de la mecánica de fluidos que usa los métodos numéricos y algoritmos para la resolución y el análisis de problemas que involucren flujos de fluidos. Permitiendo tanto la simulación de la corriente libre del fluido, como la interacción del fluido con las superficies definidas como condiciones de contorno.

Esta tipología de problemas se basa principalmente en las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son capaces de describir el movimiento de fluidos viscosos a partir de la aplicación de principios de la continuidad de masa, la cantidad de movimiento y la energía. Estas ecuaciones se pueden simplificar, sin considerar los efectos de la viscosidad, vorticidad o compresibilidad, dando lugar a distintos niveles de complejidad en el cálculo.

2.4.1.2. DEM (*Discrete Element Method*)

La metodología DEM (“Discrete Element Method”), se trata de cualquier grupo de métodos numéricos para predecir el movimiento de partículas de un sistema y el efecto entre ellas. Se considera las partículas como elementos discretos, las cuales pueden formar parte de un sistema más complejo. El movimiento de cada uno de los elementos es independiente de los demás, permitiendo la interacción entre estos mediante su contacto (choque). En general, se puede decir que el comportamiento de todo el sistema es determinado por las leyes de contacto cohesivas-friccionales.

Básicamente, des del punto de vista computacional, se pueden distinguir tres fases en el algoritmo. El problema empieza conociendo las posiciones y velocidades de cada una de las partículas, formando un grupo. Conociendo las propiedades físicas, se pueden calcular las fuerzas actuantes sobre las partículas. Finalmente, mediante estas fuerzas juntamente con las ecuaciones de movimiento, se puede predecir la posición y velocidad de cada partícula en cada paso de tiempo.

En el caso de choque entre partículas o con otras partes del sistema, las partículas son tratadas como resortes lineales para calcular las fuerzas de reacción y fricción; las cuales se añadirán a las actuantes en las partículas para el cálculo de la nueva posición y velocidad de las partículas.

2.4.2. Formulación CFD

2.4.2.1. Ecuaciones a resolver

A continuación se presentaran las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos, y por tanto las que tendrán que ser resueltas en la simulación numérica.

Para la reducción del tiempo de cálculo se asumirán unas ciertas aproximaciones que normalmente se adoptan para las simulaciones de tipo CFD. La que afecta más directamente en este apartado es la asunción de la incompresibilidad del aire, asumiendo que el cambio de densidad que se produce en el fluido es despreciable y por tanto, se considera una densidad constante en toda la simulación. De este modo, a partir de este punto se hará referencia solamente a flujos laminares e incompresibles.

Las ecuaciones de cantidad de movimiento y conservación de masa que definen el flujo de un fluido en un dominio Ω :

$$\text{Cantidad de movimiento:} \quad \rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad \text{in } \Omega \quad (1a)$$

$$\text{Conservación de masa:} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1b)$$

Donde \mathbf{V} es el vector de velocidades, $\frac{DA}{Dt}$ es la derivada material temporal de una función A o de un componente de un vector, $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de tensiones de Cauchy, ρ la densidad y \mathbf{b} el término del vector fuente (típicamente, el vector de fuerzas másicas). La derivada material temporal se expresa en diferentes formas en Lagrangiana y en Euleriana, como se explica posteriormente.

Para fluidos Newtonianos, el tensor de tensiones se divide de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\tau} - p\mathbf{I} = 2\mu\boldsymbol{\epsilon}^S - p\mathbf{I} \quad (2)$$

Donde μ es el coeficiente de viscosidad dinámica, $\boldsymbol{\tau}$ es el tensor de tensiones desviador, p la presión (positivo en compresión), \mathbf{I} es la matriz identidad y $\boldsymbol{\epsilon}^S$ el tensor de deformaciones simétrico: $\epsilon_{ij}^S = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$

Introduciendo la Eq. (2) en la Eq. (1a) y teniendo en cuenta la condición de incompresibilidad del fluido, $\frac{Dp}{Dt} = 0$, se obtienen las siguientes ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\begin{cases} \rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \nabla p + \rho \mathbf{b} & \text{in } \Omega \\ \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 & \text{in } \Omega \end{cases} \quad (3)$$

Con las condiciones de contorno adecuadas:

$$\mathbf{V} = \bar{\mathbf{V}} \quad \text{en } \Gamma_V \quad (4a)$$

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n} = (2\mu\boldsymbol{\epsilon}^S - p\mathbf{I}) \cdot \mathbf{n} \quad \text{en } \Gamma_\sigma \quad (4b)$$

Donde $\bar{\mathbf{V}}$ y $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ representan valores conocidos de velocidad y de tensiones en superficie de los contornos de Dirichlet (Γ_V) y Neumann (Γ_σ). Siendo $\Gamma = \Gamma_V \cup \Gamma_\sigma$ el contorno de Ω y \mathbf{n} el vector unitario normal a la superficie.

2.4.2.2. Formulación Lagrangiana y Euleriana

Para poder resolver numéricamente las ecuaciones anteriores se aproximan los parámetros desconocidos en el espacio y tiempo, integrando posteriormente en todo el dominio espacio-tiempo. Dependiendo en que marco de referencia se resuelvan, se puede distinguir entre formulaciones Lagrangianas y Eulerianas. Normalmente para los CFD se usa la Euleriana, mientras que en los métodos de partículas, como el DEM, la Lagrangiana.

Marco Lagrangiano

Al requerir el uso de la derivada total, se usa directamente la Eq. (3).

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \nabla p + \rho \mathbf{b} \quad (5a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (5b)$$

La definición de derivada total:

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{V}(x_p^{n+1}, t^{n+1}) - \mathbf{V}(x_p^n, t^n)}{\Delta t} \quad (6)$$

La posición de la partícula x_p^{n+1} después de la integración es conocida. De este modo, en este caso es necesario añadir el movimiento de la partícula en la ecuación. Reescribiendo la Eq. (5):

$$\rho \frac{D\mathbf{V}(x_p)}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}(x_p) - \nabla p(x_p) + \rho \mathbf{b}(x_p) \quad (7a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V}(x_p) = 0 \quad (7b)$$

$$\text{Con } \mathbf{V}(x_p) = \frac{Dx_p}{Dt} \quad (7c)$$

Donde las incógnitas son $\mathbf{V}(x_p, t)$, $p(x_p, t)$ y $x_p(t)$.

Marco Euleriano

Se usa la derivada parcial que se obtiene a partir de la Eq. (6), comportando:

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{V}(x, t)}{\partial t} + \mathbf{V}(x, t) \nabla \mathbf{V}(x, t) \quad (8)$$

Sustituyendo esta expresión en la Eq. (5a) se consigue la formulación en el marco Euleriano:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}(x, t)}{\partial t} + \mathbf{V}(x, t) \nabla \mathbf{V}(x, t) \right] = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}(x, t) - \nabla p(x, t) + \rho \mathbf{b}(x, t) \quad (9a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V}(x, t) = 0 \quad (9b)$$

Y solamente con $\mathbf{V}(x, t)$ y $p(x, t)$ como incógnitas.

2.4.3. Formulación DEM

El método de elementos discreto (DEM) permite describir el movimiento de cada una de las partículas de forma individual, teniendo en cuenta las posibles colisiones que se puedan generar contra con las paredes o entre sí mismas.

De este modo, se puede decir que DEM es un método Lagrangiano ya que todas las partículas en el dominio de estudio son rastreadas resolviendo explícitamente sus trayectorias. El balance de fuerzas para una partícula i es:

$$m_i \cdot \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}_{i,n} + \mathbf{F}_{i,t} + \mathbf{F}_{i,f} + \mathbf{F}_{i,b} \quad (10)$$

$$I_i \cdot \frac{d\omega_i}{dt} = r_{i,c} \times \mathbf{F}_{i,t} + \mathbf{T}_{i,r} \quad (11)$$

Donde $\mathbf{F}_{i,n}$ es la fuerza normal de contacto entre partículas, $\mathbf{F}_{i,t}$ es la fuerza tangencial de contacto entre partículas. $\mathbf{F}_{i,f}$ es la fuerza que puede ejercer la fase fluida de alrededor en las partículas. $\mathbf{F}_{i,b}$ engloba otras fuerzas másicas como la gravedad. $\mathbf{T}_{i,r}$ es un par de fuerzas en la partícula para modelar la no-esfericidad, ya que en la simulación cada una de las partículas es representada por una esfera.

Contacto partícula-partícula

Las ecuaciones para el cálculo de las fuerzas normales y tangenciales resultantes del contacto entre partículas son las siguientes:

$$\mathbf{F}_n = -k_n \cdot \delta_n + c_n \Delta \mathbf{u}_n \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_t = \min \left\{ \left| k_t \int_{t_{c,0}}^t \Delta \mathbf{u}_t dt + c_t \Delta \mathbf{u}_t \right|, \mu \mathbf{F}_n \right\} \quad (13)$$

Donde $\Delta \mathbf{u}_n$ y $\Delta \mathbf{u}_t$ son las velocidades normal y tangencial relativas de las partículas en contacto. k_n , k_t y c_n , c_t son los coeficientes normal y tangencial del resorte y el amortiguador, respectivamente. δ_n es la superposición normal. Estas fórmulas también son válidas en el caso de contacto partícula-pared. La superposición tangencial es interrumpida para cumplir el criterio de fricción de Coulomb, siendo μ el coeficiente de fricción.

El término con la integral representa un resorte incremental que almacena energía del movimiento tangencial relativo, simulando la deformación tangencial elástica de las superficies de las partículas que ocurre a partir del momento que se tocan en $t = t_{c,0}$. La segunda parte, el amortiguador, explica la disipación de energía del contacto tangencial. El valor de la fuerza tangencial está limitada por el límite de fricción de Coulomb, donde las partículas empezarían a deslizarse unas sobre otras.

Variando los coeficientes normal y tangencial del amortiguador, se pueden implementar diferentes tipos de modelos de contacto.

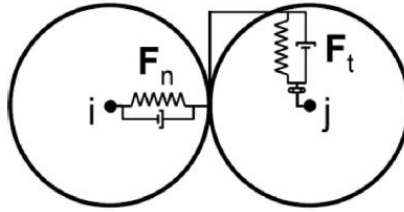


Figura 11. Modelo simple contacto partículas. Resorte-amortiguador.

Algoritmo detección de contacto

En cada uno de los instantes de tiempo se genera una lista de posibles contactos entre partículas a partir de las evaluaciones basadas en los contactos actuales. Una pareja de partículas se añaden a la lista de vecinos si:

$$\| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \| < r_i + r_j + s \quad (14)$$

Donde s es el parámetro de Verlet que se puede escoger libremente dentro de unos límites, este determina hasta cuanto la lista es válida. Considerando un paso de tiempo constante Δt y una

velocidad máxima de partícula v_{max} , se puede decir que la lista es válida para N_{verlet} pasos de tiempo:

$$N_{verlet} = \frac{s}{2 \cdot v_{max} \cdot \Delta t} \quad (15)$$

De este modo, la detección de colisiones se basará en la misma lista hasta los N_{verlet} pasos de tiempo antes de la creación de una nueva.

2.4.4. Formulación CFD-DEM

El movimiento de un flujo incompresible con la presencia de una fase secundaria de partículas se rige por las ecuaciones de volumen-medio de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial (\alpha_f \mathbf{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = -\alpha_f \nabla \frac{p}{\rho_f} - \mathbf{R}_{pf} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (17)$$

Donde α_f es la fracción de volumen ocupada por el fluido, ρ_f es su densidad, \mathbf{u}_f su velocidad, y $\boldsymbol{\tau} = \nu_f \nabla \mathbf{u}_f$ es el tensor de tensiones para la fase fluida. \mathbf{R}_{pf} representa el intercambio de la cantidad de movimiento con la fase de partículas, que se calcula para cada celda en que hayan las dos fases a partir de las fuerzas de arrastre de las partículas.

Los pasos seguidos para la resolución de las ecuaciones son los siguientes:

- Se calculan las posiciones de las partículas y sus velocidades con el solucionador DEM.
- La posición y velocidades de las partículas se pasan al solucionador CFD.
- Para cada partícula, se determina la correspondiente celda en el mallado de CFD.
- Para cada celda, se determina la fracción de volumen y la velocidad media de la partícula.
- En la base de la fracción de volumen de la partícula, se calculan las fuerzas del fluido actuando en cada una de las partículas.
- Los términos del intercambio de la cantidad de movimiento partícula-fluido son ensamblados a partir de las fuerzas de partículas, por el promedio del ensamblaje del conjunto de partículas en una celda CFD.
- Se calculan las fuerzas de fluido actuando en cada partícula y se pasan al solucionador DEM, que se usaran en el siguiente paso de tiempo.

- El solucionador CFD calcula la velocidad del fluido teniendo en cuenta la fracción de volumen local y el intercambio de la cantidad de movimiento.
- Ecuaciones adicionales, como la concentración de partículas, se pueden evaluar.

En las simulaciones realizadas en este trabajo se ha considerado acoplamiento unidireccional entre el fluido y las partículas, es decir, el movimiento de las partículas es afectado por el fluido pero no viceversa. Se hace esta suposición, debido a que el flujo de las partículas es disperso y la fuerza que pudieran enviar al fluido se puede despreciar. De este modo, las partículas se moverán a la misma velocidad que el fluido de su alrededor.

CAPÍTULO 3:

ANÁLISIS

3.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe la metodología usada para efectuar la simulación fluido-partículas del elemento distribuidor usando el pre y post procesador GiD juntamente con dos módulos de Kratos Multiphysics: Fluid Dynamics Application y Swimming DEM application.

La geometría de referencia analizada en este capítulo corresponde, a una actualmente en uso en esta tipología de máquinas neumáticas, proporcionada por una marca comercial.

Posteriormente se analizan los resultados obtenidos, primero solamente centrándose en el comportamiento de la distribución de velocidades del fluido a lo largo del elemento, y seguidamente se relaciona con las trayectorias seguidas por las partículas.

3.2. METODOLOGÍA

La metodología básica que se aplica en esta tipología de problemas se puede dividir en tres fases principales.

La primera se trata del pre-proceso en la cual se genera la geometría del elemento y se define el volumen de control del fluido, quedando así definido el espacio donde se realizará la simulación. Seguidamente, se procederá a la discretización del volumen ocupado por el flujo con la generación de una malla de volúmenes finitos, que nos darán resultados más o menos precisos dependiendo del tamaño de los elementos de esta. En esta fase también se define el modelo físico del problema y las condiciones de contorno, estableciendo el comportamiento del fluido y sus propiedades en las superficies de contacto con el sólido.

La segunda fase consiste en el cálculo propiamente dicho, donde tiene lugar la simulación numérica en la que las ecuaciones que gobiernan el problema son resueltas iterativamente para

cada uno de los puntos que conforman la malla. Para la resolución de las ecuaciones se ha usado un esquema monolítico. Para poder saber cuándo el problema converge, se van comparando los resultados con la iteración anterior. De modo que cuando las variaciones entre las iteraciones son suficientemente pequeñas, el proceso iterativo se da por finalizado, consiguiendo la solución final.

En la tercera y última fase es donde se hace el análisis de los resultados mediante un post-procesador, el cual permite la visualización de los resultados obtenidos de diferentes formas, por ejemplo con diagrama de contornos, vectores, animaciones, etc., en distintos pasos de tiempo.

3.1.1. Geometría

El primer paso para la correcta simulación del cabezal distribuidor consiste en crear la geometría a analizar. Esta se ha creado a partir del diseño proporcionado por una marca comercial. A continuación se muestra el esquema básico y las dos vistas principales con las dimensiones correspondientes del elemento a estudiar.

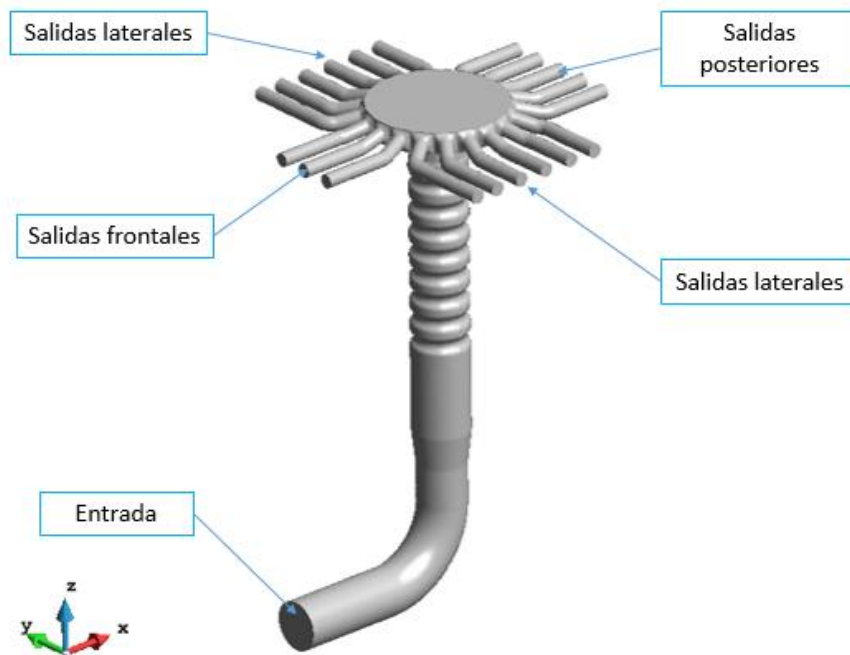


Figura 12. Esquema básico del elemento distribuidor.

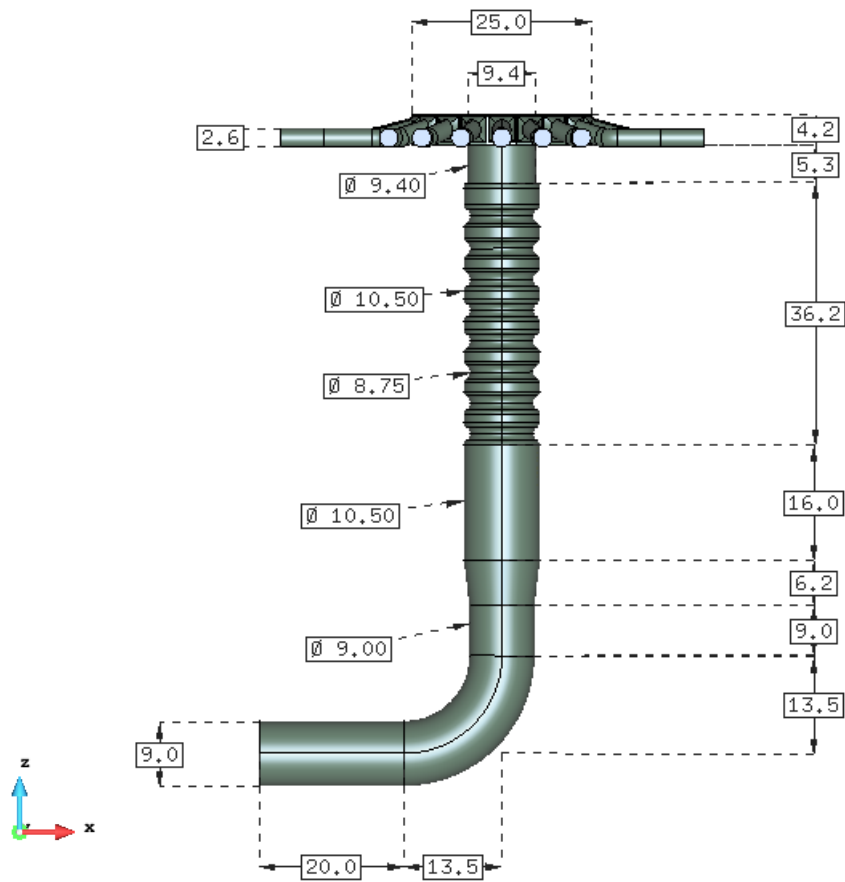


Figura 13. Alzado del elemento (cm).

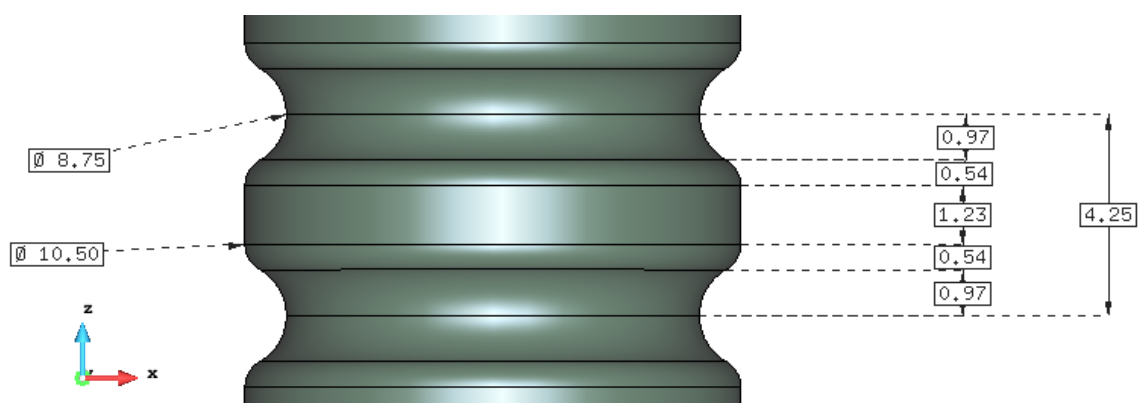


Figura 14. Alzado, detalle ondulaciones (cm).

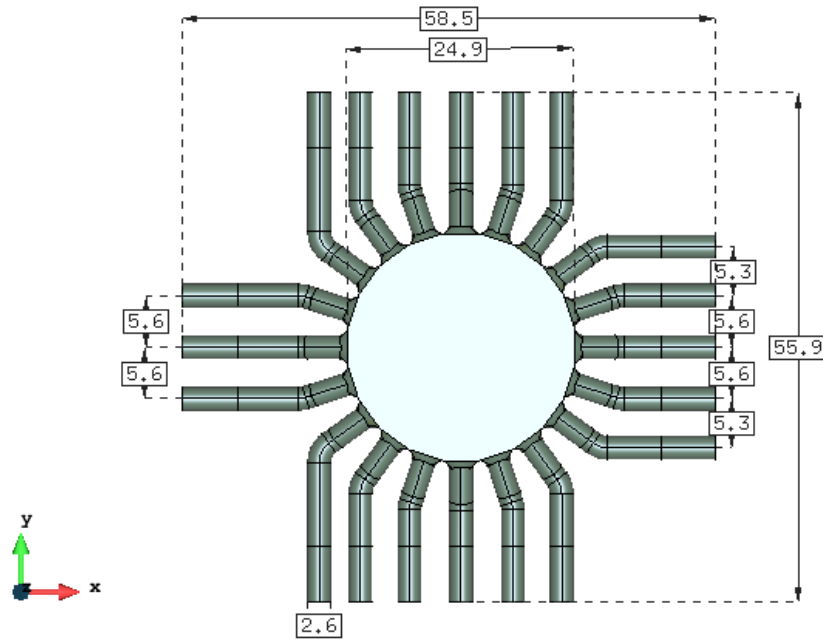


Figura 15. Vista en planta del elemento (cm).

Tal y como se ha podido observar, el elemento está formado por un tubo horizontal recto correspondiente con la última parte de la manguera de transporte seguido por un codo de ángulo recto, el tubo de guiado vertical con un segundo tramo con ondulaciones y por último el propio cabezal distribuidor con 20 mangueras de salida distribuidas uniformemente por alrededor del cabezal. El espesor de los elementos no es relevante para el estudio en cuestión, solamente se le exige suficiente rigidez para que el elemento no se deforme con la corriente de aire y partículas.

También se definen las semillas de trigo como partículas esféricas de tamaño uniforme e indeformable.

En este modelo no se han considerado las longitudes totales ni del conducto de entrada ni de los tubos de salida del cabezal, pero si se han conservado los diámetros de los mismos.

3.1.2. Condiciones de contorno

Una vez definida la geometría del elemento se procede a asignar las condiciones de contorno y las propiedades físicas de la fase continua (aire) y de la discreta (semillas).

Para el aire se adopta una densidad $\rho=1,23 \text{ kg/m}^3$ y una viscosidad dinámica de $\mu=2.00\text{e-}5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, en el caso de las partículas la densidad es de 750kg/m^3 y el diámetro de 3mm.

Para poder efectuar la simulación del problema es necesario que todo el perímetro del elemento quede definido por las condiciones de contorno correspondientes, ya sean dadas por velocidad o presión.

3.1.2.1. Entrada y salidas del sistema

Respecto a la fase continua del problema, se ha fijado la superficie de entrada y las de salida del fluido, con una velocidad constante de 35m/s en la primera y una presión manométrica nula en las de salida, correspondiente con la velocidad del corriente de aire proporcionado por la bomba y a la presión atmosférica respectivamente.

Por otro lado, para la fase discreta del problema, es decir para las partículas, se ha supuesto una superficie de inyección a pocos centímetros de la entrada de fluido formada por una sección llena de partículas las cuales son aleatoriamente impulsadas por la corriente de aire de la entrada, obteniendo un cabal suficiente para la correcta simulación del elemento.

3.1.2.2. Paredes internas del sistema

Las paredes de los conductos del elemento por donde circula el aire se consideran impermeables y con la existencia de la fuerza de rozamiento, modificando el perfil de velocidades. De este modo, para poder considerar la zona de perturbación del movimiento del flujo debido a la presencia de las paredes del elemento, se tiene que añadir un grupo de mallas simulando la capa límite que se genera en la realidad.

En esta simulación solamente se ha dispuesto solamente de un mallado de capa límite con un espesor de una décima de milímetro, proporcionando resultados bastante realistas con un coste computacional asequible; a pesar de que lo más exacto sería el uso de 2 o 3 mallas para representar esta capa límite pero se dispararía notablemente el coste de cálculo.

De este modo, la adición de una malla muy fina de 0.1mm de espesor en el contorno del conducto, crea elementos de menor tamaño para poder representar de forma más realista el salto de velocidades producido por las fuerzas de rozamiento en la pared, es decir, con un gradiente más grande.

El uso de la malla de capa límite solamente se ha podido efectuar en la zona del conducto, dejando sin al cabezal superior, ya que el programa utilizado no era capaz de mallar esta geometría más compleja.

Se han establecido condiciones “No-Slip” en todo el elemento, asumiendo velocidad relativa nula del fluido en el contacto de este con el contorno sólido del elemento.

En la simulación también se considera la posibilidad de choques entre partículas y rebotes contra las paredes internas. Las condiciones de contorno se resumen en la *figura 16*.

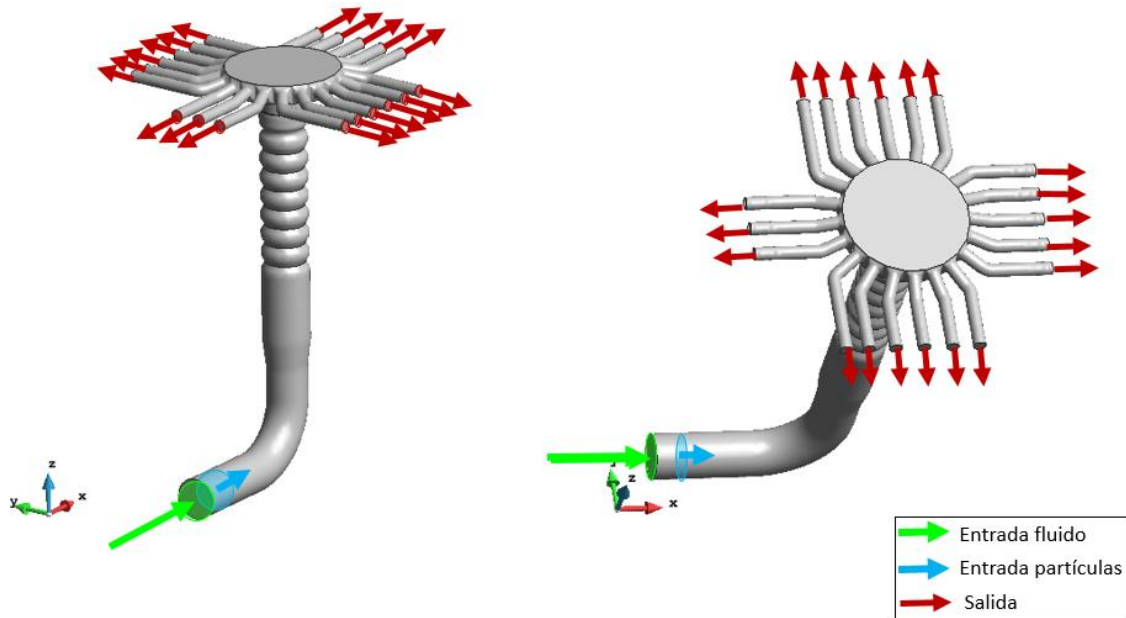


Figura 16. Esquema condiciones de contorno.

3.1.3. Mallado

Con la geometría creada y las condiciones de contorno definidas se procede a la generación del mallado del problema. Este paso es de vital importancia ya que designa los elementos en donde el comportamiento del flujo se resolverá.

Para el problema en cuestión, se han definido tres tipologías de mallado correspondientes a cada una de las partes interactuantes.

	Tipo elemento	Número elementos
Volumen fluido	Tetraedros	1.968.741
Paredes internas	Triángulos	92.180
Partículas	Esferas	Variable en función del paso de tiempo

Tabla 1. Elementos de mallado utilizados.

El mallado se ha hecho de forma no estructurada para la correcta adaptación a la geometría del elemento. Se ha dado más densidad de elementos en la parte superior del cabezal ya que es la parte más crítica y con más detalle del problema en cuestión. En la *figura 17* se muestran los tamaños usados para las diferentes zonas del elemento. Además, como se ha comentado anteriormente en las condiciones de contorno, se ha dispuesto de un mallado de capa límite de

0.1mm en todo el contorno del tubo como se observa en la *figura 18*. Se puede comprobar que efectivamente se trata de una malla donde se pasa de velocidad cero a la del interior del elemento en muy poco grosor.

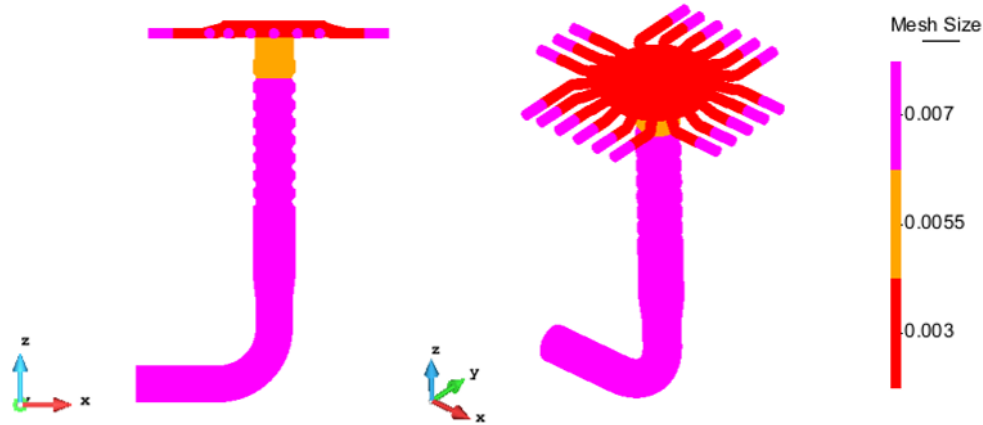


Figura 17. Esquema de tamaños de mallado según la zona del elemento.

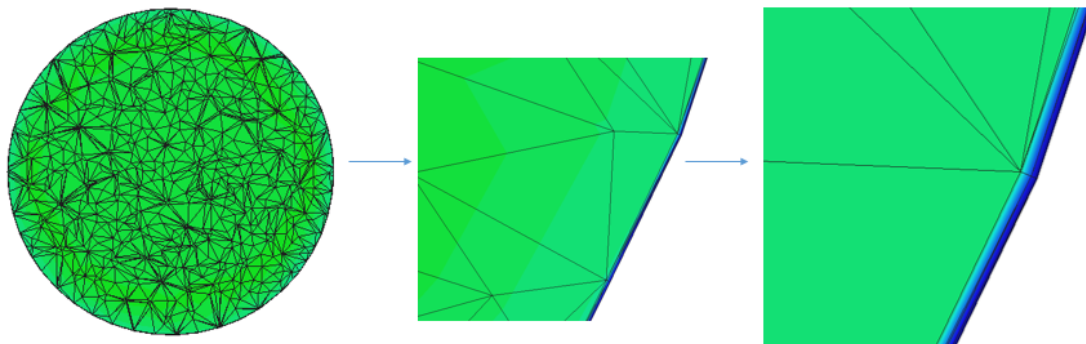


Figura 18. Zoom de la capa límite en una sección.

Se puede observar que el mallado en las mangueras de salida es diferente entre la primera y segunda mitad de su recorrido, doblando el tamaño de los elementos en la salida; modelizado así para evitar la inversión de velocidades del fluido en las superficies de salida. De esta manera, con el aumento del tamaño se consigue que no haya suficiente resolución para reproducir la formación de un remolino que pueda ocasionar velocidades de entrada al sistema por una superficie asignada como salida.

En las siguientes figuras se representa el mallado de todo el volumen de fluido del problema juntamente con unas secciones transversales del conducto.

Se puede observar que la malla es suficientemente densa para efectuar la correcta simulación del problema, ya que en las secciones circulares de aproximadamente 9cm de diámetro el

número de elementos de malla es suficientemente elevado para conocer el comportamiento del flujo.

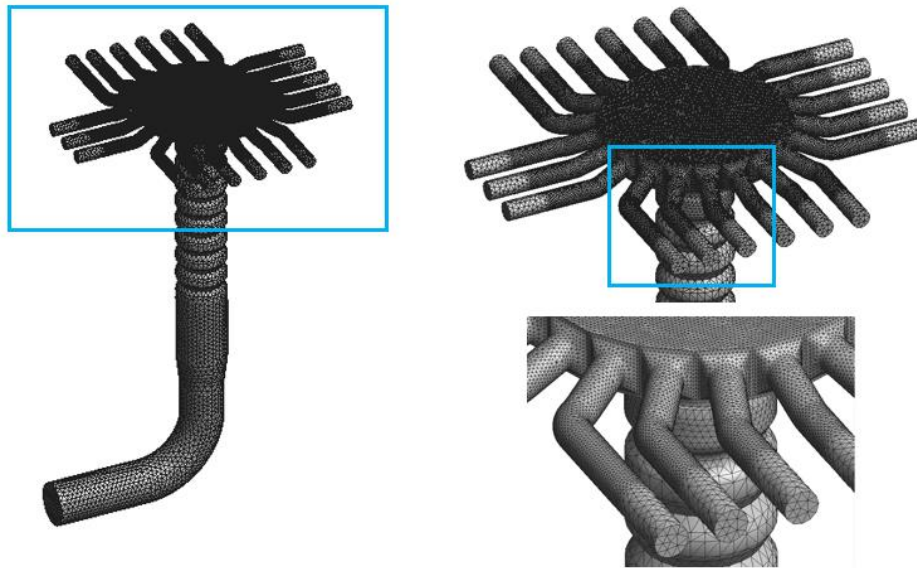


Figura 19. Mallado general del elemento.

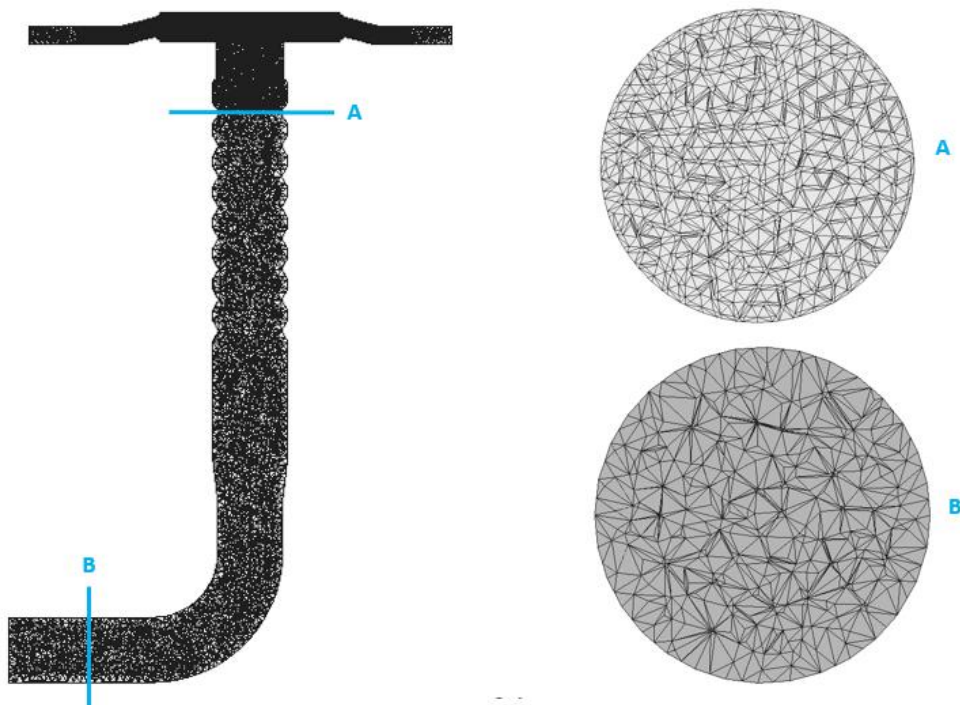


Figura 20. Representación del mallado en secciones.

3.1.4. Paso de tiempo

La simulación numérica del elemento se ha efectuado por dos segundos de duración. Se considera que esta es suficiente para el análisis, ya que la evolución del flujo desde la puesta en marcha de la bomba de aire se produce de forma casi instantánea en el elemento.

El paso de tiempo de cálculo utilizado es de 0.001 segundos, ya que si se hacía más grande el problema era inestable debido al número de Courant, como se comenta a continuación.

El CFL Number o Courant Number se usa en modelos numéricos como CFD, para evitar la desestabilización del problema en el cálculo. Este se define como:

$$C = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (18)$$

Donde u es la velocidad del fluido, Δt el paso de tiempo y Δx la distancia entre elementos de malla.

Este parámetro expresa con que proximidad se propaga la información de un elemento de malla a otro. Es decir, para valores más pequeños o igual a la unidad, significa que las partículas de fluido se moverán de una celda a otra en un paso de tiempo como mucho. Por el contrario, para valores superiores a la unidad, la información del fluido se mueve por más elementos de malla en un mismo paso de tiempo.

Dependiendo del problema, valores muy elevados pueden afectar negativamente a la convergencia de los resultados. Para la resolución de esta tipología de problemas y con los programas actuales se pueden aceptar valores de CFL de 10-20, sin llegar nunca a los 100 o 200 en el que es imposible la resolución.

De este modo, teniendo en cuenta las velocidades y el tamaño de la malla del elemento se ha decidido calcular con un paso de tiempo de 0.001 segundos.

3.2. RESULTADOS

En este apartado se analizan los resultados obtenidos a partir de la simulación del problema. Estos se dividen en dos partes, la primera para el análisis del comportamiento únicamente del fluido (sin tener en cuenta las partículas), y seguidamente este se relacionará con las trayectorias seguidas por las partículas.

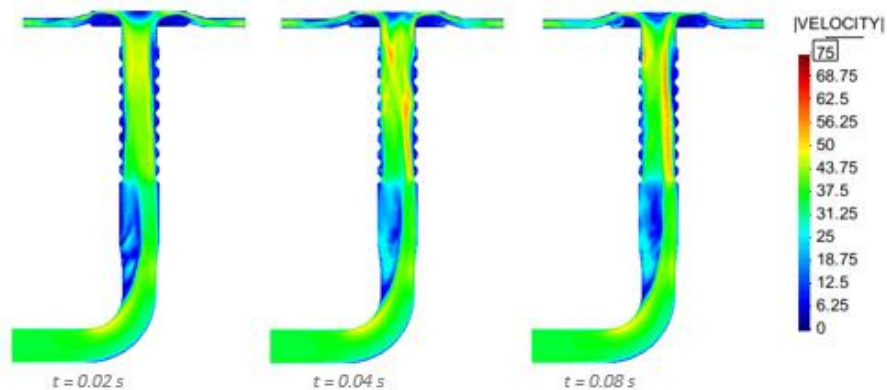
Los parámetros más relevantes para el análisis de los resultados son la velocidad del fluido y la trayectoria que siguen las partículas desde el punto de entrada hasta la salida. También será objeto de estudio el número de partículas que salen por cada uno de los conductos de salida, para comprobar la uniformidad o no del cabezal distribuidor.

3.2.1. CFD, sólo fluido sin partículas

Para el estudio del comportamiento del fluido se analiza el cambio y distribución de velocidades a lo largo del elemento dependiendo de la geometría en cada zona.

3.2.1.2. Determinación estado estacionario

Para conocer a partir de que instante de tiempo aparece la estacionalidad del flujo, primero de todo se analiza la distribución de velocidades en dos de las secciones principales más representativas del elemento, correspondiente a un corte vertical y a dos horizontales del cabezal superior. A continuación se muestran las velocidades en diferentes instantes de tiempo durante el primer medio segundo de simulación.



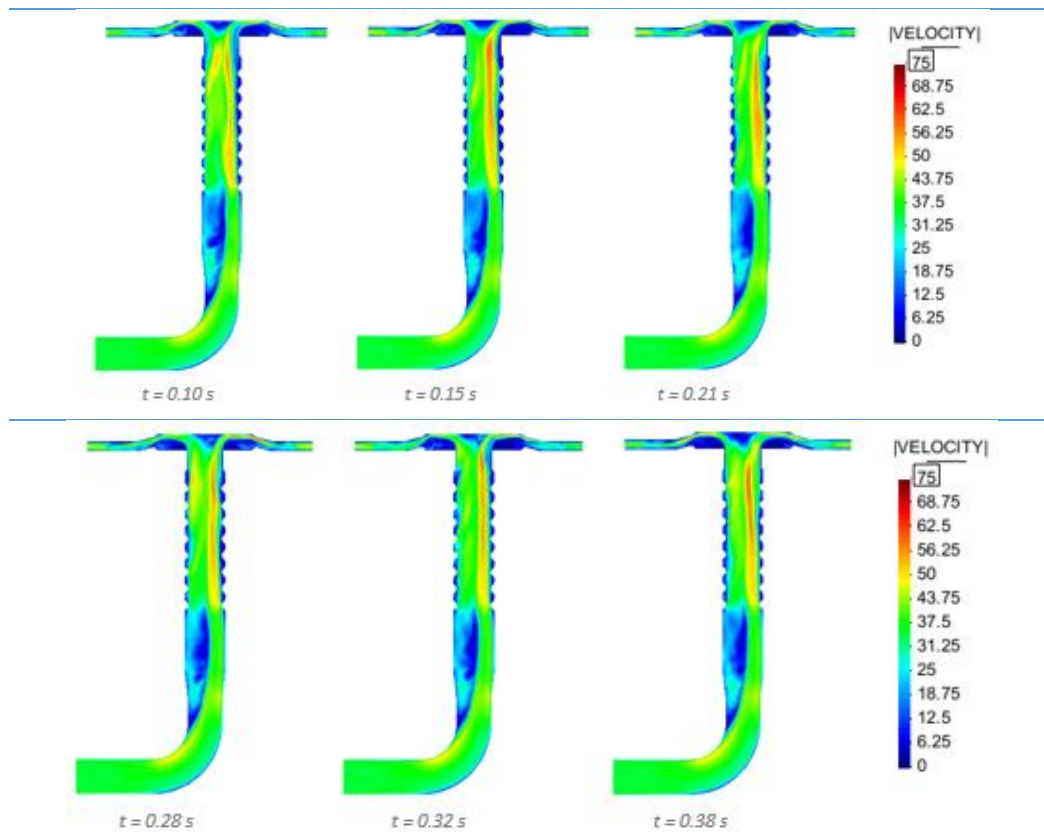


Figura 21. Distribución de velocidades en la sección vertical representativa. Modelo de referencia.

La *figura 21* permite ver la evolución de la distribución de velocidades en diferentes instantes de tiempo, donde se puede observar una estacionalidad del flujo en la mitad inferior del elemento a partir de las primeras centésimas de segundo. Esta consiste en la formación de una corriente principal que empieza en la parte interior del codo y se dirige hacia la pared posterior del elemento en la salida del codo, de este modo, se forma una zona con velocidades bajas en la parte frontal del ensanchamiento.

No obstante, en la mitad superior se empiezan a ver variaciones entre los diferentes instantes de tiempo, con lo aparición momentánea de lo que parece una corriente secundaria en la parte superior de la pared frontal del conducto vertical. Estas variaciones probablemente son debidas a las turbulencias generadas por la geometría del tramo con ondulaciones. Sin embargo, en la pared posterior la corriente principal sigue ascendiendo verticalmente aumentando su velocidad a la llegada a este tramo.

Para mostrar mejor los cambios producidos en el cabezal circular producidos por las turbulencias en el tramo con ondulaciones, en la *figura 22* se muestra la sección horizontal resultante del corte efectuado por la mitad de las mangueras de salida, superpuesta con la sección superior donde se dan las mayores velocidades.

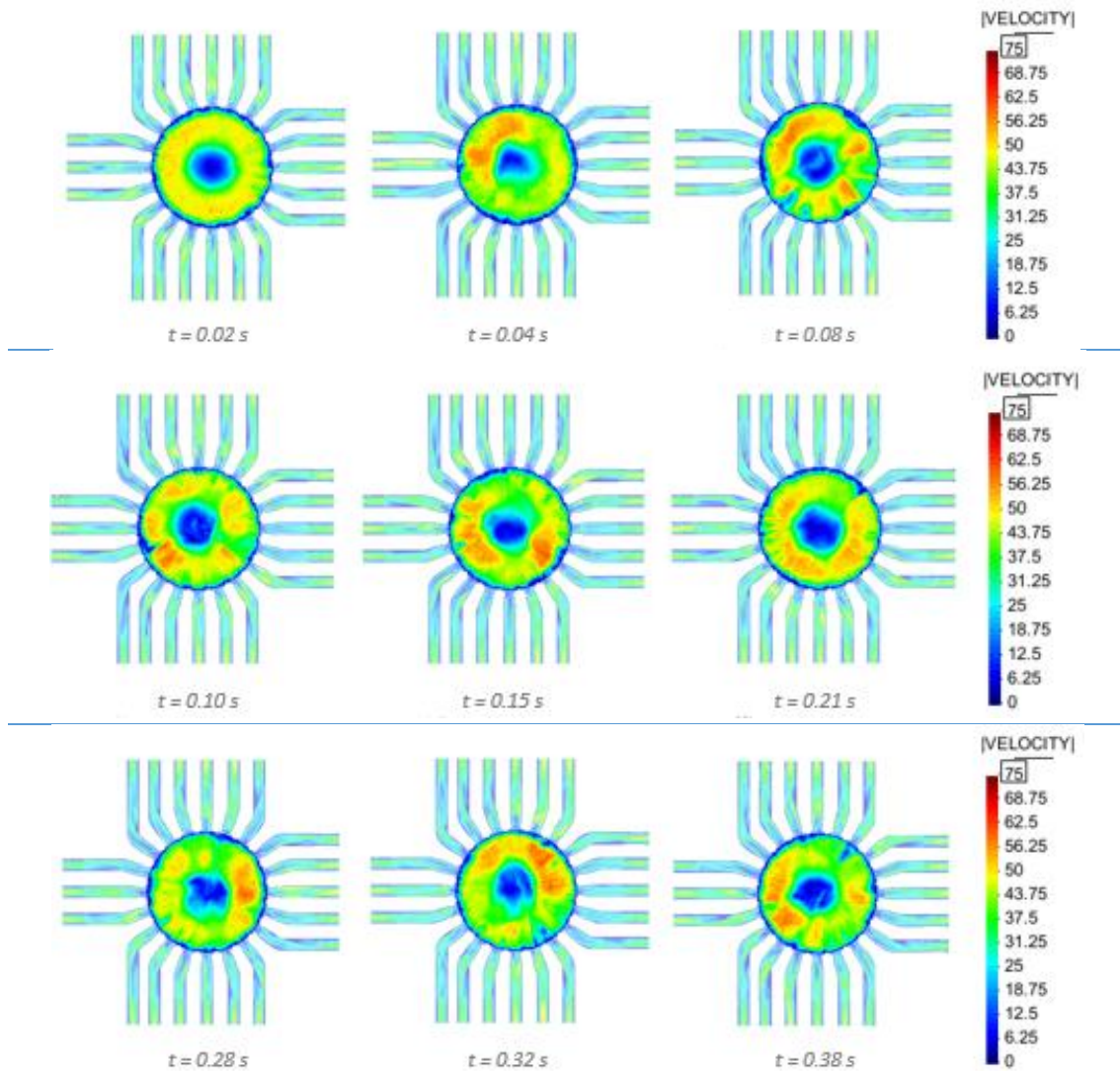


Figura 22. Distribución de velocidades en el cabezal superior. Modelo de referencia.

A partir de la figura anterior se observan los cambios de velocidades que se dan en el cabezal superior, estos consisten en la aparición de zonas con velocidades más elevadas que se van moviendo por el perímetro. A simple vista estos parecen no seguir ningún patrón de movimiento definido, habiendo instantes que ocupan más superficie que en otros. De este modo, se afirma que no se llega al estado estacionario en todo el elemento debido a las turbulencias generadas en el tramo anterior con ondulaciones.

3.2.1.2. Análisis velocidades

A continuación se analizará el comportamiento del flujo primero de una manera más global en todo el elemento y posteriormente más detalladamente a lo largo de las diferentes secciones. Para hacerlo, se ha centrado únicamente en un mismo instante de tiempo para poder ver la evolución del flujo al pasar por las diferentes partes que lo componen.

Global

Antes de mostrar las secciones transversales del elemento, en la *figura 23* aparecen las dos secciones principales para tener una primera idea general del comportamiento del flujo.

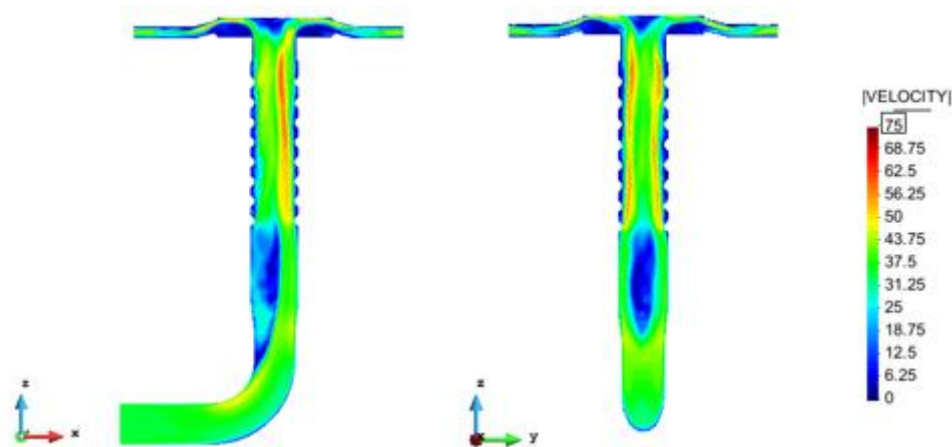


Figura 23. Distribución de velocidades en las dos secciones verticales principales. Modelo de referencia.

Como se ha dicho anteriormente, lo más destacado en estas secciones corresponde a la aparición de una corriente principal en la parte posterior y laterales del elemento, debida al cambio de dirección que se produce en el tramo del codo; ya que en el tramo anterior a este se ve bastante uniforme. Además, este también es el culpable de la formación de la zona de velocidades bajas que aparece en la parte interior central de la salida del codo, alargándose por todo el tramo del ensanchamiento del conducto.

Una vez llegado al tramo con ondulaciones, se acentúa la velocidad tomada por la corriente principal conservando su trayectoria ascendente. No obstante, a partir de la mitad superior del tramo, se observa el intento de creación de otra corriente secundaria proveniente de las paredes laterales. Estos fenómenos son producidos por las turbulencias generadas por la geometría de este tramo.

Finalmente al alcanzar el cabezal circular, al haber un cambio de sección importante con salidas en todo su contorno y con una pared superior, el flujo que entra de forma ascendente tiende a inclinarse a medida que llega a la parte superior central del elemento; descendiendo posteriormente en forma de ola buscando las salidas más próximas siguiendo una trayectoria que se podría asimilar a la de una seta. De este modo, se forman zonas de turbulencias en la parte superior central del cabezal y en el nivel de las mangueras de salida alrededor de la corriente principal de velocidades.

Seccional

Seguidamente, se realiza un análisis más detallado del comportamiento del fluido mediante diferentes secciones transversales a lo largo del conducto, de esta forma se podrá conocer mejor las distribuciones de velocidades en el interior del conducto. A continuación se muestra un esquema donde se señalan las secciones consideradas para el análisis.

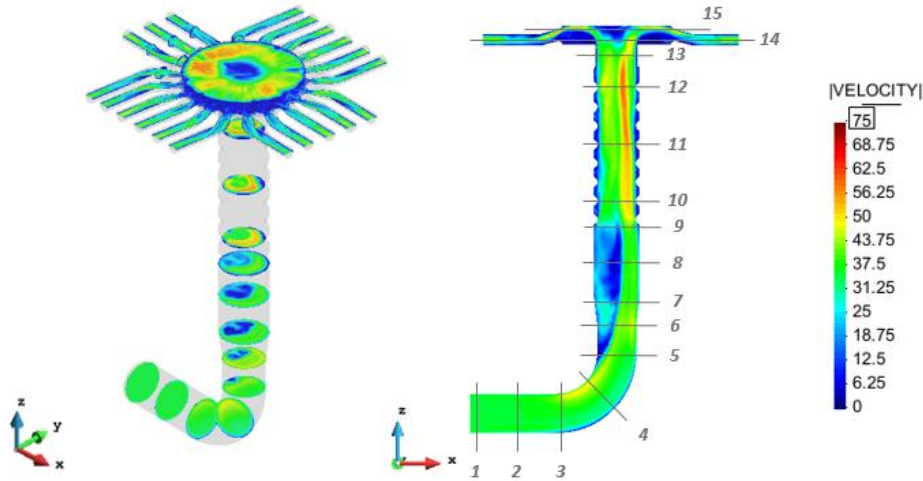


Figura 24. Esquema de secciones transversales para el análisis. Modelo de referencia.

Para una mejor comprensión del análisis se muestran las secciones transversales indicadas anteriormente en dos figuras consecutivas.

Las secciones correspondientes a la primera mitad del elemento se muestran en la *figura 25*. Se comprueba que en el tramo horizontal las velocidades son uniformes en toda la sección hasta llegar al inicio del codo, donde aparecen velocidades más bajas en la parte inferior y más elevadas en la superior. En el transcurso del flujo por el codo se observa una tendencia a despegarse de la parte interior y dirigirse a la pared posterior, generando una zona de velocidades bajas en la parte frontal-central del conducto.

Seguidamente se encuentra un pequeño ensanchamiento gradual de la sección, pasando de 9cm a 10,4cm de diámetro. Se puede observar que se produce una bajada de velocidades general en toda la sección y la formación de una corriente principal que ocupa la pared posterior y laterales del conducto, dejando el centro y la parte frontal del ensanchamiento con velocidades más bajas, generando una posible turbulencia en esta zona. Como resultado, se consigue un perfil de velocidades en forma de “C” invertida, la cual se va abriendo más a medida que asciende por el conducto.

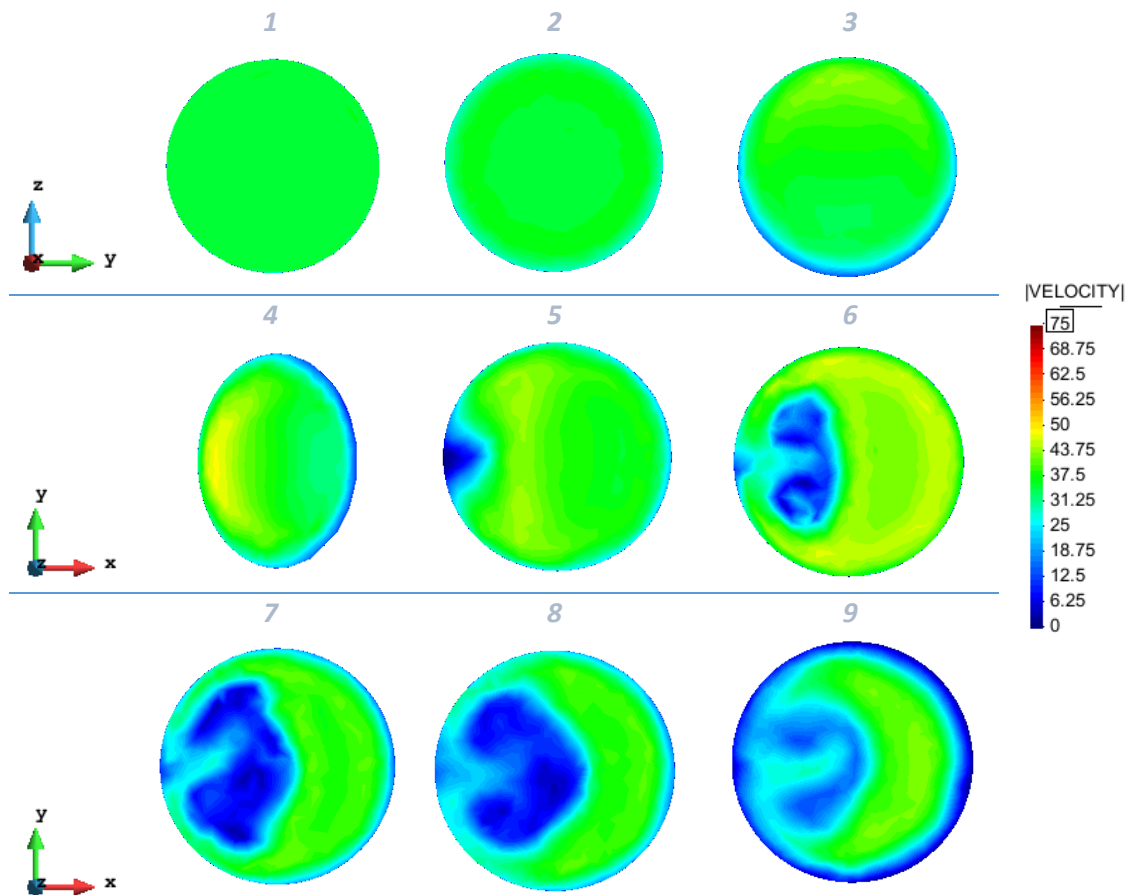


Figura 25. Distribución velocidades en secciones transversales mitad inferior. Modelo de referencia.

Las secciones transversales de la mitad superior del elemento, correspondientes al tramo con ondulaciones y al cabezal circular, se presentan en la *figura 26*.

De forma general se puede observar a simple vista el gran cambio de velocidades producido desde la entrada hasta la salida del tramo con ondulaciones. Partiendo de una distribución en forma de “C” invertida, la geometría del conducto en esta parte es capaz de ir transformándola hasta llegar a una especie de círculo en un intento de homogeneizar las velocidades. Dando como resultado, en la salida del tramo, una distribución mucho más uniforme que en la entrada, sin haber tanta variación entre los valores de velocidades de la misma sección.

A partir de las secciones del cabezal circular, se puede observar que se produce una zona de velocidades bajas en toda la parte inferior y en la parte superior central por donde impacta el flujo en su entrada. Además, se observa que los puntos donde aparecen velocidades más elevadas en la sección de entrada, tienen una cierta similitud con las zonas donde se encuentran los valores más altos en la sección superior del cabezal.

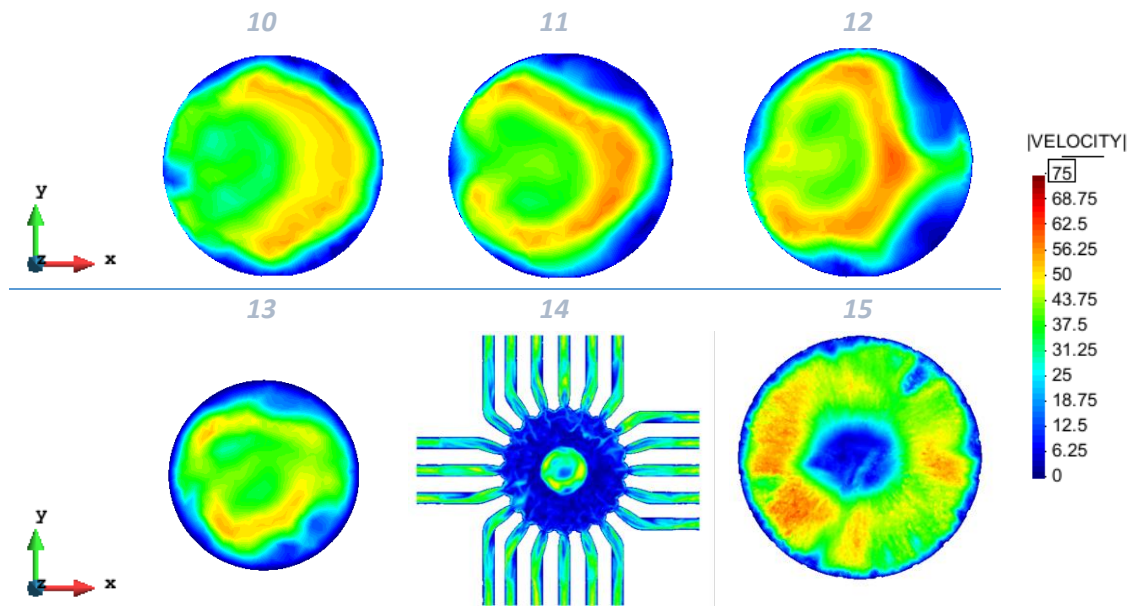


Figura 26. Distribución velocidades en secciones transversales mitad superior. Modelo de referencia.

3.2.1.3. Conclusiones

Tras el análisis del comportamiento del fluido por el paso de las diferentes partes del elemento estudiado, se puede concluir que el codo es el principal causante de la aparición de la corriente principal con velocidades elevadas y de la zona de turbulencia.

Posteriormente, gracias al ensanchamiento se consigue reducir de forma general las velocidades de la sección, ya que el perfil de la corriente principal se extiende y se suavizan las diferencias entre los valores máximos y mínimos de velocidad de la sección. Sin embargo, este también genera la formación de una zona con velocidades bajas que podría ser perjudicial para el movimiento de las partículas.

Seguidamente, aparece el tramo con ondulaciones el cual se ha comprobado que es el más importante para la homogenización de las velocidades en las secciones. Como se ha visto anteriormente, este permite pasar de una sección con una corriente principal y unas zonas de turbulencias muy definidas, a otra en la cual la corriente principal se suaviza y se eliminan las zonas de velocidades bajas.

Finalmente la última parte corresponde al cabezal distribuidor, en el que se ha podido observar que se necesita una sección de entrada con velocidades bastante uniformes en la entrada, para poder lograr en las mangueras de salida una distribución homogénea de velocidades. No obstante, al no llegar al estado estacionario, esta está en continuo cambio sin conseguir una uniformidad total de las velocidades, apareciendo diferentes picos localizados durante toda la simulación.

3.2.2. CFD-DEM, con partículas

A continuación se analiza el comportamiento de las partículas en el interior del elemento, mirando su distribución en diferentes instantes de tiempo, las trayectorias seguidas y el número de partículas expulsadas por cada una de las bocas de salida.

3.2.2.1. Estado inicial

La introducción de las partículas en el elemento se ha efectuado con la disposición de una sección, posterior a la entrada de velocidad, con partículas que van siendo arrastradas por el flujo de aire.

Como se ha dicho anteriormente, se ha supuesto un acoplamiento unidireccional y por tanto, las velocidades que tomen las partículas corresponden a la del fluido que tienen alrededor. De este modo, como la bomba de aire genera una corriente de aire de 35m/s, las partículas entraran en el sistema con la misma velocidad de 35m/s, tal y como se observa en la *figura 27*.

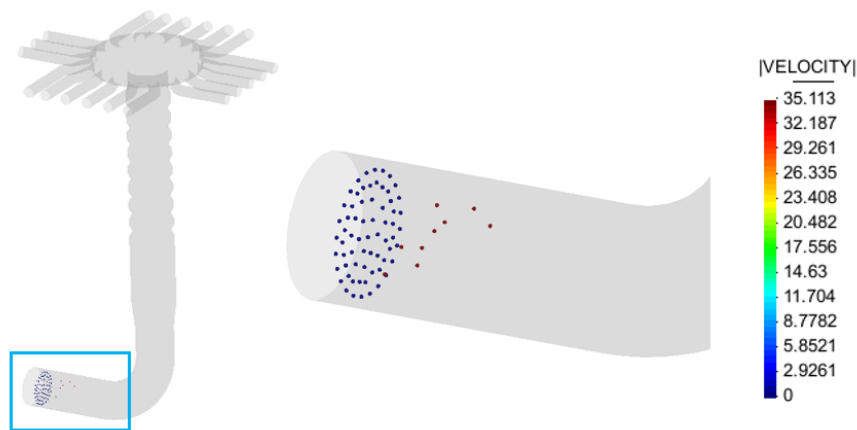


Figura 27. Entrada partículas al sistema con sus velocidades.

3.2.2.2. Visión general

Para tener una primera idea global del comportamiento de las partículas, a continuación se muestra la evolución de las partículas en el interior del elemento junto con su velocidad en diferentes instantes de tiempo. El tamaño de las partículas que aparecen en las siguientes figuras está aumentado para la mejor visualización de los resultados.

Como ocurría en el análisis de la distribución de velocidades del apartado anterior, en los primeros instantes es cuando se produce un mayor cambio respecto a la disposición de las semillas ya que coincide con la puesta en marcha de la bomba de aire. Permitiendo así, conocer las trayectorias de las semillas en los instantes iniciales y su evolución con el paso del tiempo.

En la *figura 28* se puede observar que hasta la primera media décima de segundo, las partículas parecen seguir la trayectoria de la corriente principal de velocidades anteriormente comentada. Sin embargo, a partir del instante $t=0.05s$ las primeras partículas alcanzan el cabezal superior del elemento, y es cuando empiezan a haber partículas con velocidades muy bajas en el tramo vertical ondulado, debido a las turbulencias que se generan en su interior y al aumento de la cantidad de partículas.

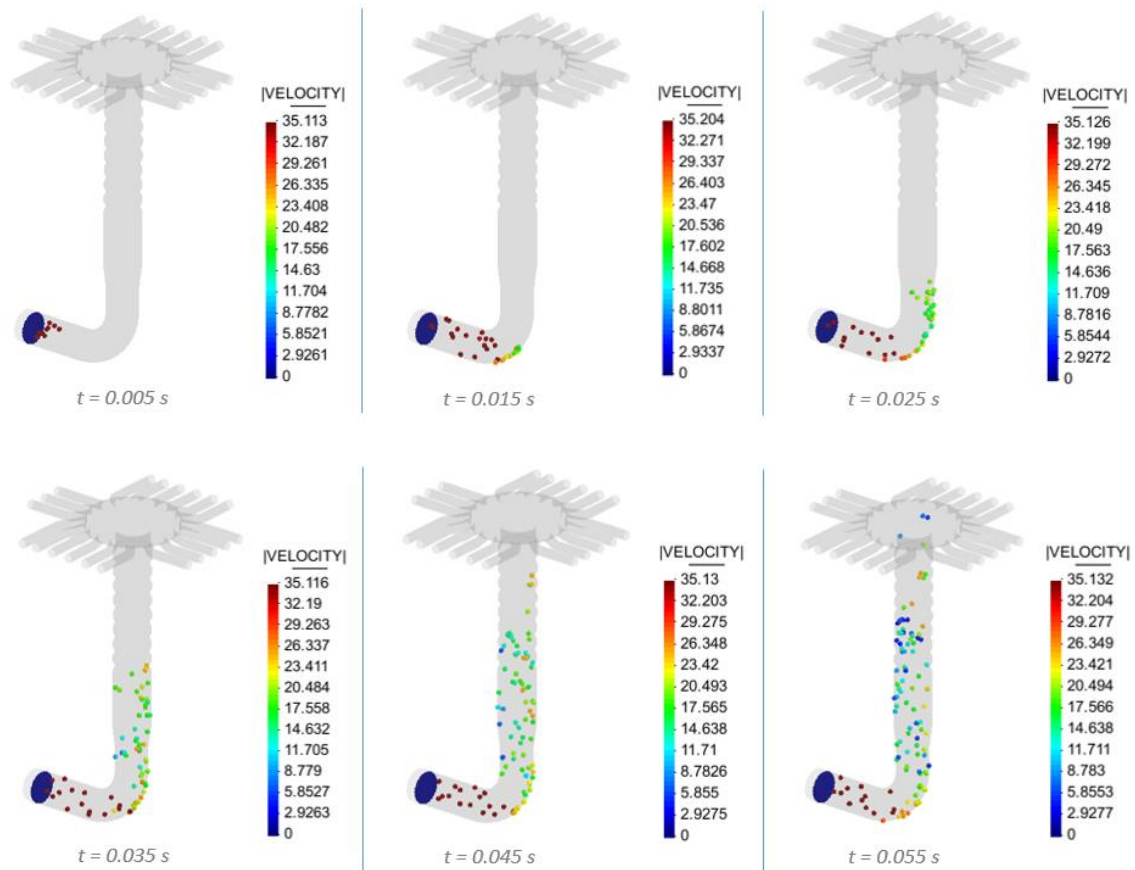


Figura 28. Distribución y velocidades de partículas entre $t=0.005s$ y $t=0.055s$.

La unión de los efectos de la turbulencia con el aumento de partículas en cada instante, se va haciendo cada vez más notorio a partir de la segunda décima de segundo desde el inicio de la simulación. Dejando la mayor parte de las partículas del sistema con velocidades bajas en el cambio de sección del conducto vertical (pasando de liso a ondulado). Este fenómeno provoca una alta concentración de partículas en el centro del tubo de guiado vertical, extendiéndose posteriormente, por toda su longitud transcurrido un segundo desde la puesta en marcha de la bomba.

Además, se puede observar que en las paredes laterales, debido a la capa límite comentada anteriormente, alguna de las partículas tiende a pegarse a éstas en el tramo vertical, avanzando

más lentamente en todo el contorno. Finalmente éstas también acaban ocupando parte del codo, dando como resultado un incremento de partículas también en el cabezal superior. Facilitando, a priori, la salida de estas por las mangueras. Como se puede apreciar en la *figura 29*.

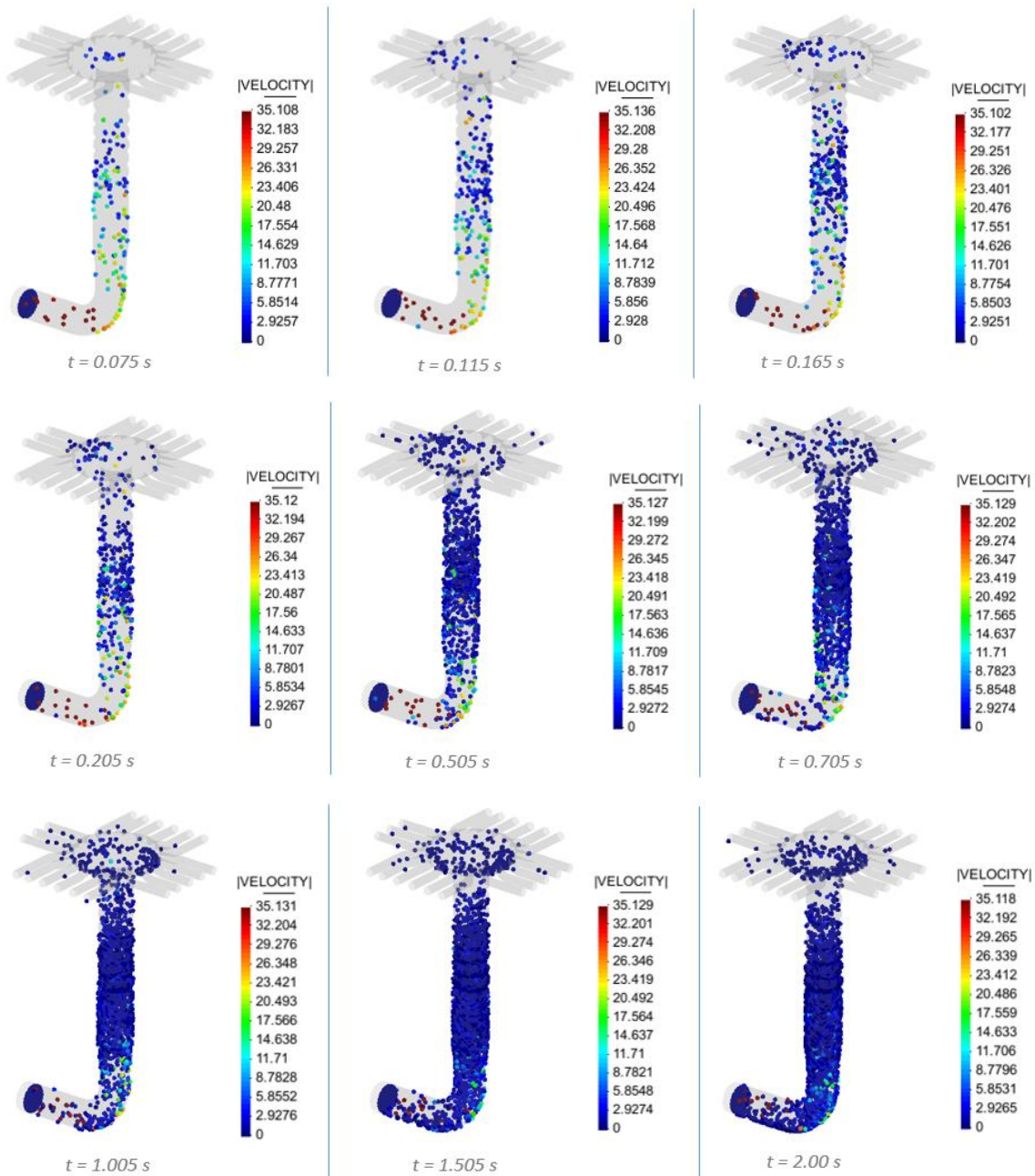


Figura 29. Distribución y velocidades de partículas entre $t=0.075s$ y $t=2.00s$.

3.2.2.3. Análisis partículas

Seguidamente, se analizará más detalladamente la evolución de las trayectorias de partículas por el paso de cada una de las partes principales del elemento distribuidor. Se han seleccionado

los instantes de tiempo más representativos para poder explicar adecuadamente el comportamiento de las partículas.

Tramo horizontal

En el conducto horizontal por donde se produce la entrada de las partículas y a su vez la corriente de aire, se observa que en todo momento se mantiene el mismo caudal de entrada de partículas, las cuales entran en el sistema a 35m/s.

En la *figura 30* se observa que a partir de la primera décima de segundo empiezan a aparecer partículas con velocidades bajas en la parte inferior, provenientes del codo (es decir, en sentido contrario al flujo). Estas se van incrementando con el paso del tiempo hasta llegar a ocupar la parte central y superior, en menor medida, de la sección. Este fenómeno se debe al incremento de partículas en el conducto vertical de guiado y a las turbulencias generadas en esa parte del elemento.

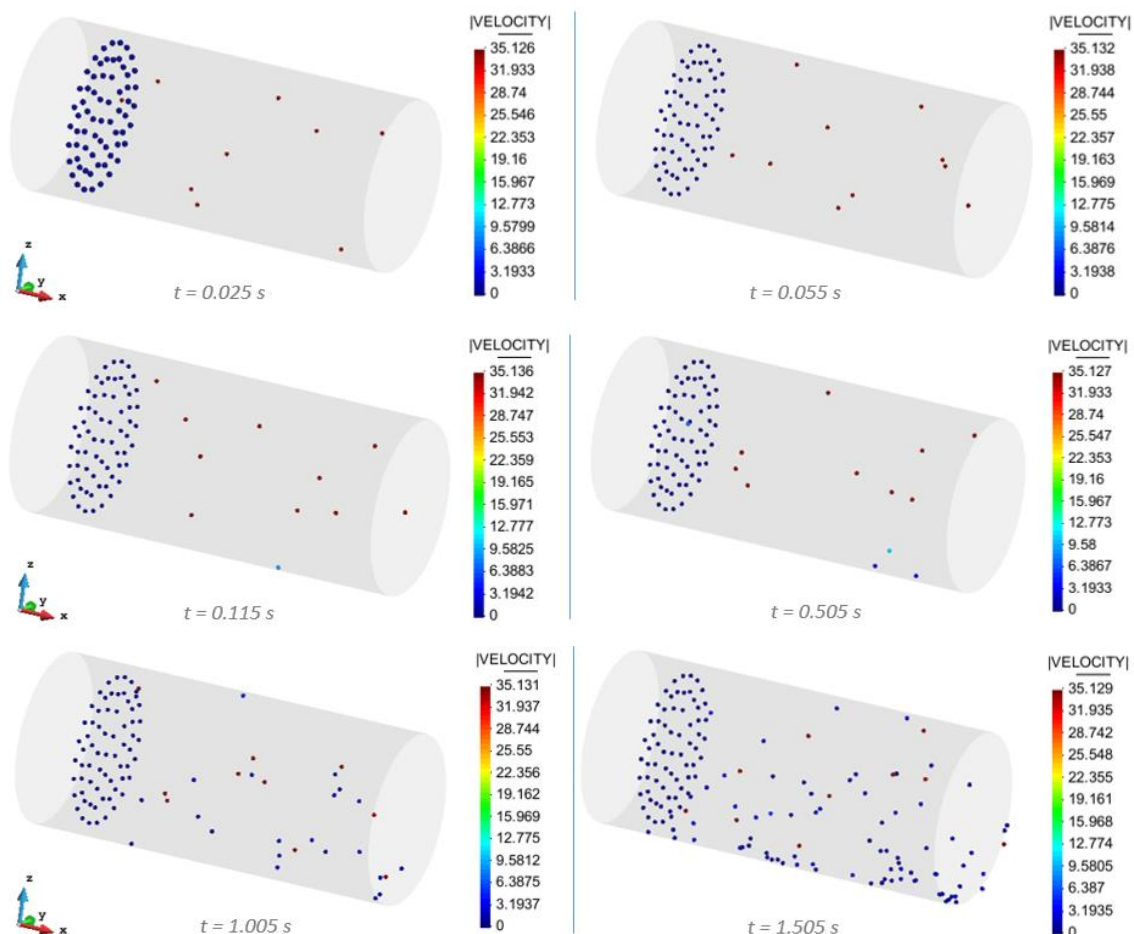


Figura 30. Distribución y velocidad de las partículas en el tramo horizontal.

Codo 90°

Cuando las partículas alcanzan el codo de 90°, la trayectoria bastante uniforme que seguían en el tramo horizontal se ve afectada, ya que el movimiento de las partículas se ve interrumpida por la presencia del codo.

De este modo, igual que pasaba con la distribución de velocidades y como se aprecia en los primeros instantes de la *figura 31*, aparece una tendencia de las partículas a pegarse a la pared exterior del codo, disminuyendo progresivamente sus velocidades hasta llegar a los 20m/s aproximadamente en el final de éste.

A partir de la primera décima de segundo y como pasaba en el tramo horizontal, aparecen partículas con velocidades bajas (alrededor de los 6-3m/s) en la parte central e interna del codo. También se observa su incremento con el paso del tiempo y su disminución de velocidades de forma general.

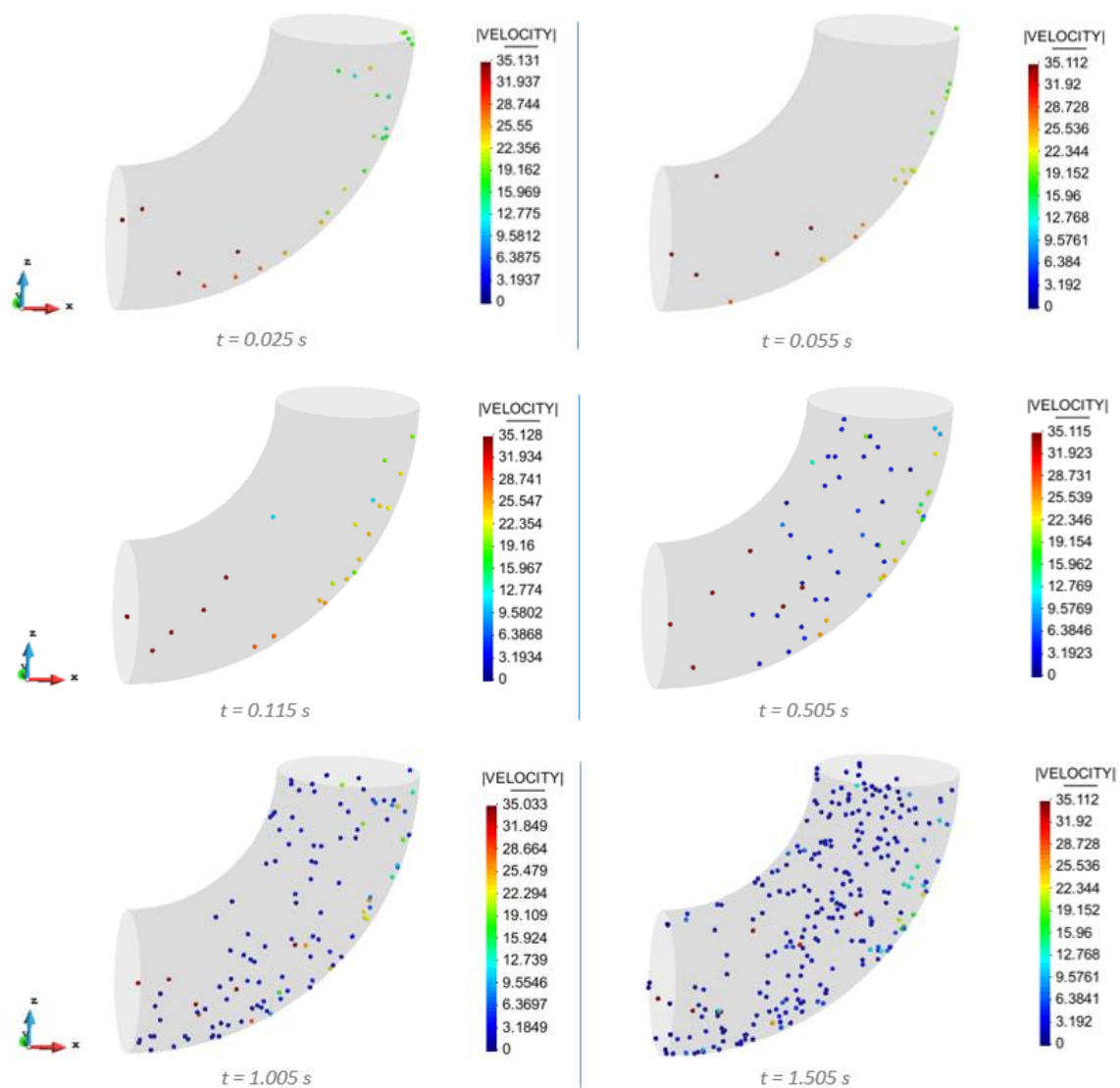


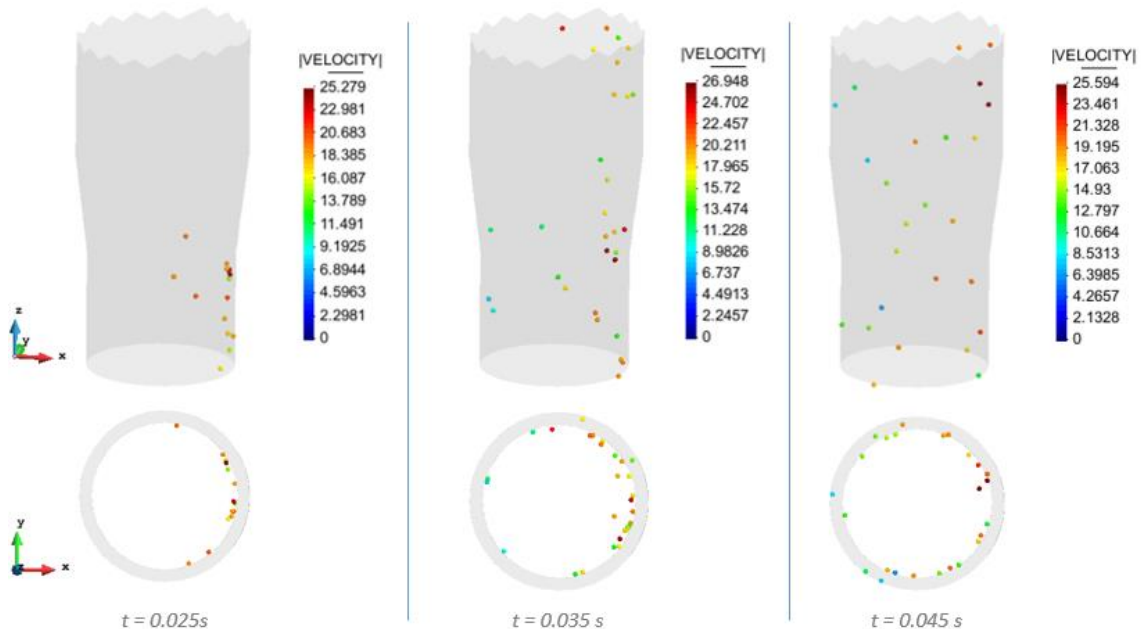
Figura 31. Distribución y velocidad de las partículas en el codo de 90°.

Ensanchamiento

Se puede observar que las partículas procedentes del codo acceden a esta parte del ensanchamiento por la pared que sigue la exterior del codo, debido también a la distribución de velocidades. No obstante, rápidamente estas también se van esparciendo por las paredes laterales del perímetro a medida que van elevándose. Las velocidades de estas partículas son medias-altas, variando entre 12-25m/s.

Como anteriormente se ha comentado, en esta parte se vuelve a observar la aparición de partículas con velocidades bajas, descendiendo por el conducto vertical. En un primer momento, éstas aparecen en el lado correspondiente al interior del codo, y se van distribuyendo por todo el perímetro. Además, a partir del primer medio segundo de simulación, van ocupando la parte central de la sección. A pesar de este fenómeno, se conserva el ascenso de las partículas en la pared exterior.

Este comportamiento se corresponde bastante al observado en las velocidades, ya que como se ha visto en el apartado anterior, en este tramo la corriente principal de velocidades tiene forma de "C" inversa, dejando zonas de turbulencias en el centro y en la pared interior del conducto.



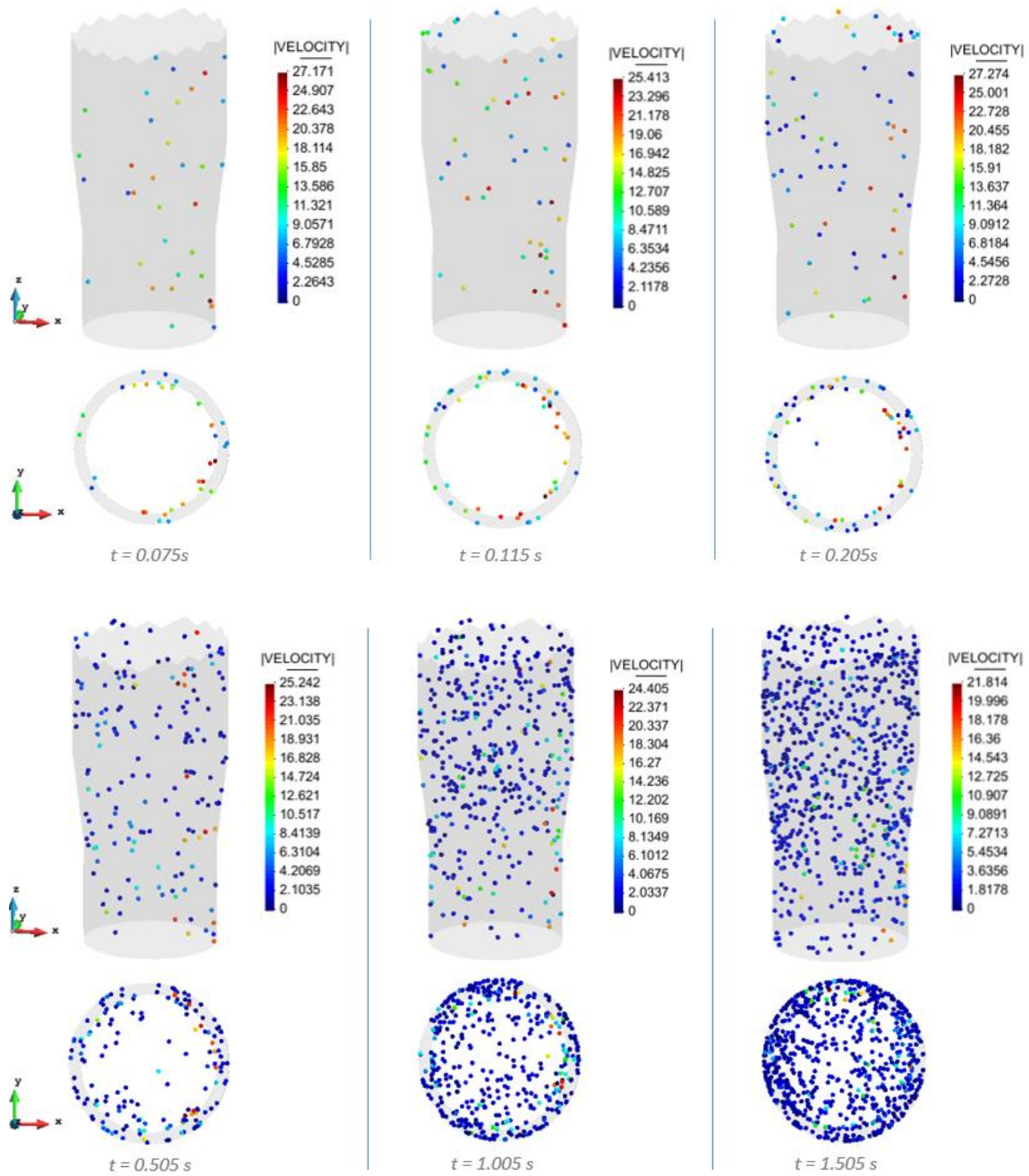


Figura 32. Distribución y velocidad de las partículas en el ensanchamiento.

Tramo con ondulaciones

Seguidamente, se encuentra el tramo vertical con ondulaciones. Se ha dividido por la mitad para el análisis de los resultados obtenidos con el fin de hacerlo más entendedor.

En los primeros instantes la densidad de partículas es baja y ésta se va incrementando con el paso de tiempo, tal y como pasaba en los otros tramos del elemento.

En la primera mitad del tramo con ondulaciones, se observa como las partículas van entrando de forma bastante dispersa. No obstante, su trayectoria empieza a modificarse debido a los cambios de sección en esta parte, afectando tanto a la distribución de velocidades como el recorrido seguido de las partículas. Provocando así, un aumento de densidad de partículas y una reducción de sus velocidades en toda la sección con el paso de tiempo.

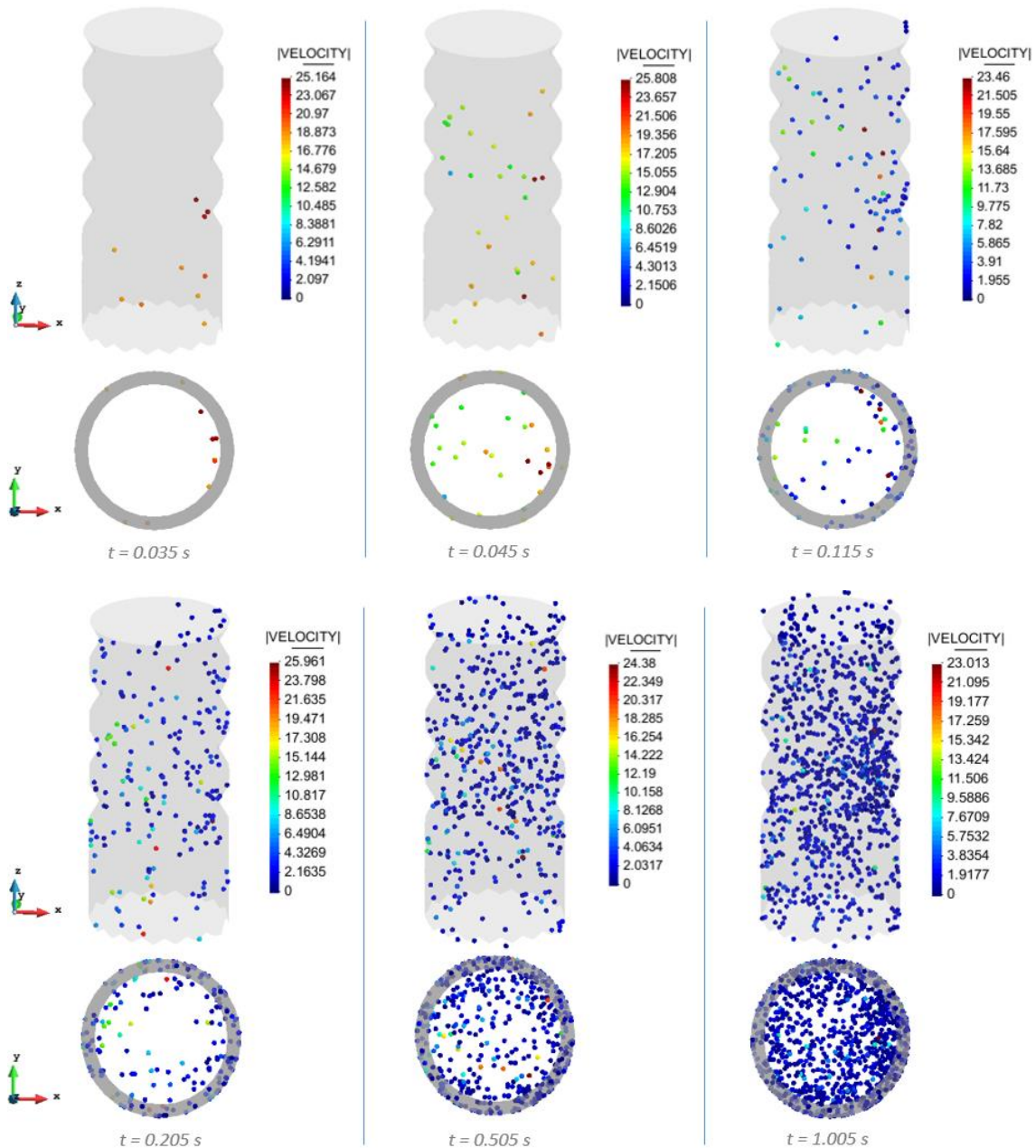


Figura 33. Distribución y velocidad de las partículas en la primera mitad del tramo con ondulaciones.

En la segunda mitad (figura 34), se aprecia que la densidad de partículas es considerablemente menor que en la primera, exceptuando la parte inferior de ésta. Además, las velocidades de salida se reducen respecto a las de entrada.

De este modo, se puede concluir que la acumulación de partículas se inicia alrededor de la mitad inferior del tramo ondulado del elemento. Extendiéndose hacia abajo debido a la pérdida de velocidad de las partículas, juntamente con la fuerza de la gravedad; generando las acumulaciones mencionadas anteriormente en la resta del elemento.

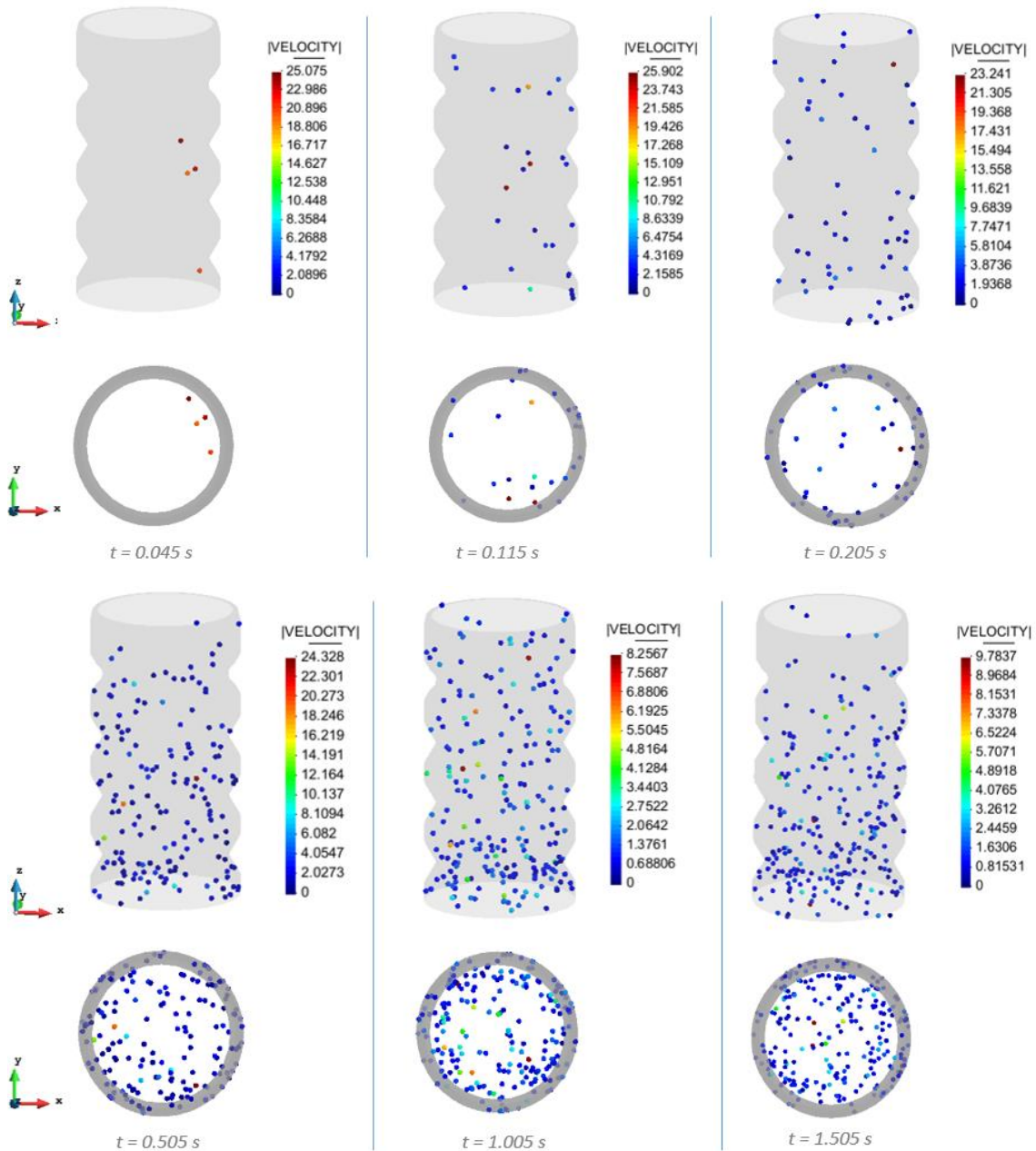


Figura 34. Distribución y velocidad de las partículas en la segunda mitad del tramo con ondulaciones.

Cabezal circular

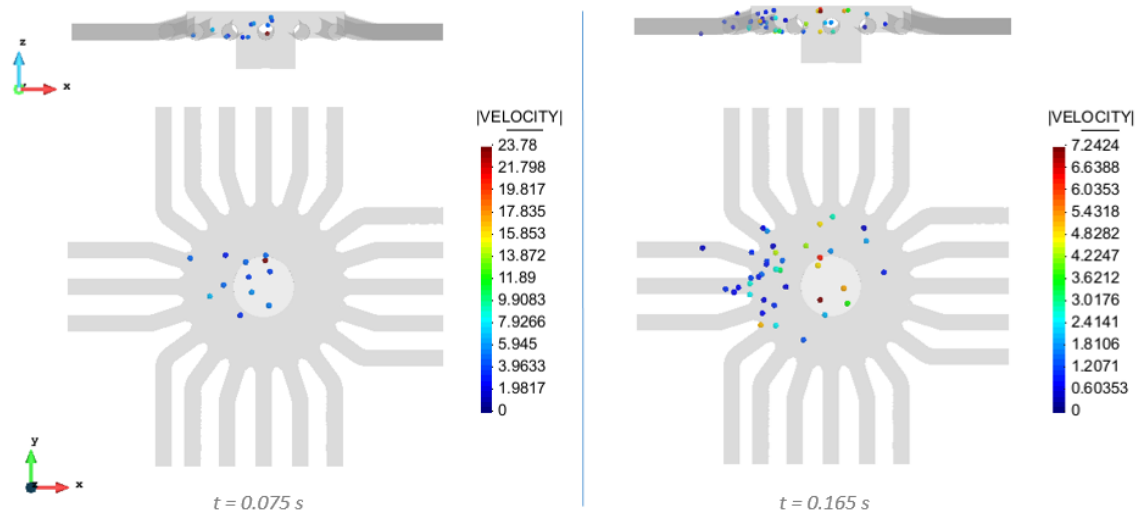
Finalmente, las partículas llegan al cabezal distribuidor buscando la salida del sistema mediante las mangueras distribuidas alrededor del perímetro.

Solamente con la llegada de las primeras partículas al cabezal, se puede observar claramente una tendencia de éstas a ir en dirección a la parte frontal del elemento, es decir, por el mismo lado por donde entran las semillas en el elemento distribuidor. A medida que transcurre el tiempo, la distribución de partículas se va uniformizando más por todo el cabezal, como se puede ver en la *figura 35*.

Otro aspecto relevante es la acumulación de partículas que se forma en la base circular inferior del cabezal. Siguiendo la distribución de velocidades vista en el apartado anterior, este fenómeno se produce en las zonas donde aparecen velocidades muy bajas y casi nulas. De este modo, cuando entran en el cabezal las partículas parecen ser impulsadas hacia arriba debido a la corriente de aire, pero posteriormente éstas van decayendo, quedándose con velocidades muy bajas en la superficie de alrededor de la entrada del tubo de guiado vertical.

No obstante, la entrada continuada de partículas y aire permiten, en ciertos casos, la recuperación del movimiento de estas semillas para que puedan encontrar la salida del elemento.

La velocidad de las partículas en las salidas de las mangueras se ha reducido notablemente respecto a la de entrada en el sistema, siendo variable dependiendo de cada una de las semillas.



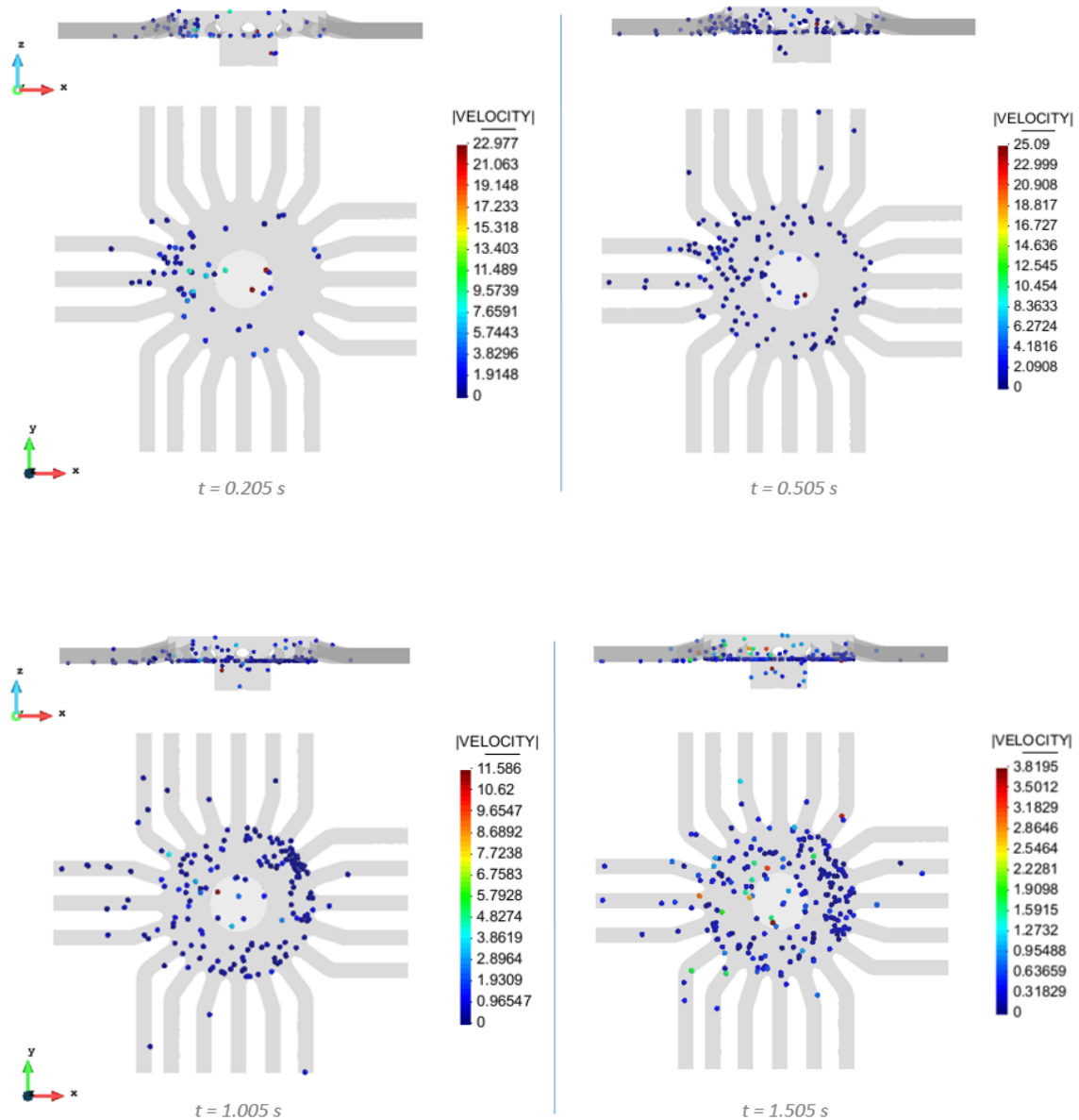


Figura 35. Distribución y velocidad de las partículas en la segunda mitad del tramo con ondulaciones.

3.2.2.4. Trayectorias partículas

Una vez mostrado por separado la distribución de velocidades del fluido y de partículas en el interior del elemento, a continuación se relaciona ambos resultados entre ellos para saber si sus comportamientos son similares o no.

De forma global se puede decir que las partículas sí que parecen seguir la corriente principal marcada por el fluido. Tal y como se observa en la *figura 36*, las trayectorias seguidas por las partículas en la primera parte del elemento se concentran en las zonas donde la velocidad del fluido es más elevada. No obstante, a partir del tramo con ondulaciones, las trayectorias parecen dejar de seguir la corriente principal del fluido debido a las turbulencias generadas por la

superficie ondulada del elemento. Finalmente, a la llegada del cabezal distribuidor, las partículas tienden a seguir otra vez la corriente principal del aire.

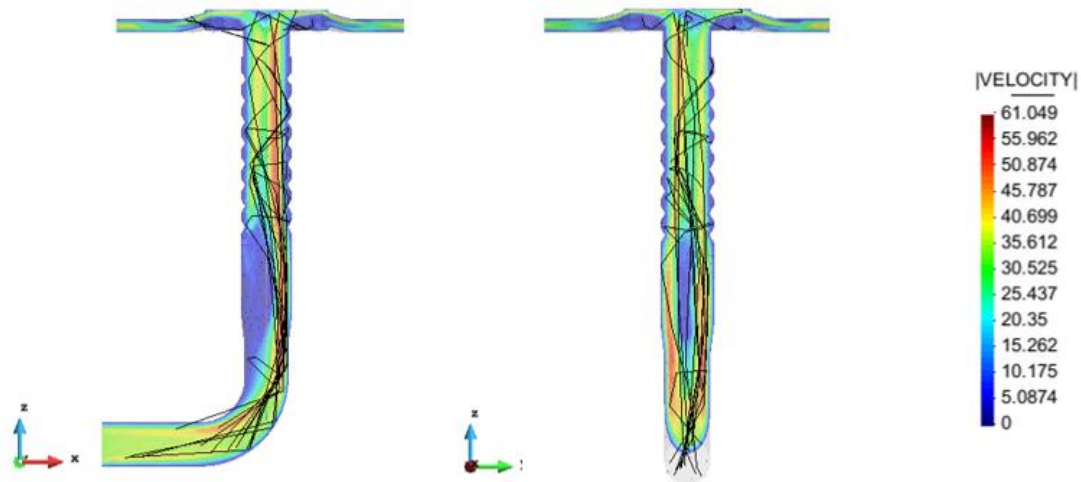


Figura 36. Distribución velocidades y trayectoria seguida por las partículas en secciones principales.

Seguidamente, se analiza con más detalle el comportamiento de ambas partes. En esta ocasión se ha dividido el elemento en tres partes con la finalidad de facilitar la representación de las trayectorias y la distribución de velocidades obtenidas.

Codo y ensanchamiento

La primera parte engloba el tramo horizontal, el codo y el ensanchamiento. Como se puede observar en la *figura 37*, las trayectorias de las partículas con velocidades elevadas siguen correctamente la corriente principal del flujo. Es decir, al llegar al codo estas tienden a chocar contra la pared exterior pegándose a ella y a las laterales, con la posterior elevación directa hasta el siguiente tramo.

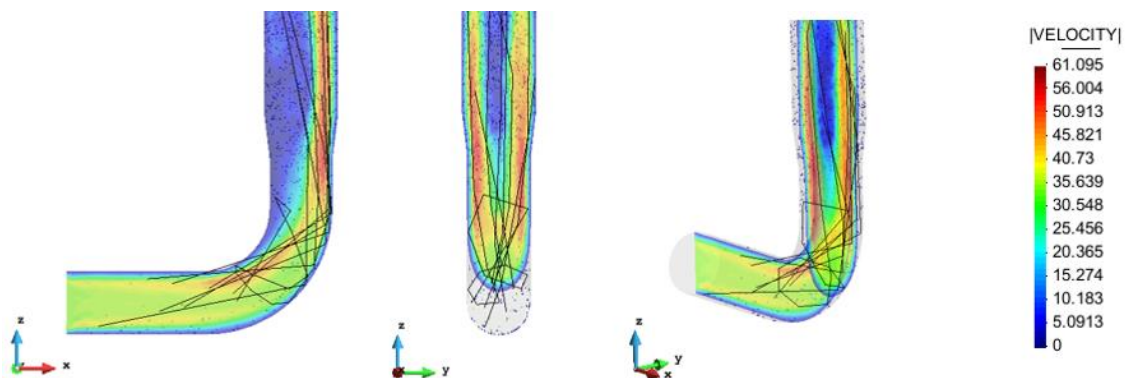


Figura 37. Velocidades y trayectoria partículas en tramo horizontal, codo y ensanchamiento. Corriente principal.

Sin embargo, a parte de la corriente principal, aparecen unas zonas considerables de velocidades bajas en este tramo. Como se ha dicho anteriormente, estas son las denominadas zonas de

turbulencia, en las cuales las partículas pierden velocidad y tienden a descender debido a la fuerza de la gravedad, provocando una acumulación de partículas. En la *figura 38* se muestra este fenómeno de decaída de partículas, todas las trayectorias representadas se corresponden a partículas que van en sentido contrario del corriente principal. De este modo, las trayectorias seguidas son más suaves y redondeadas debido a la baja velocidad de las partículas.

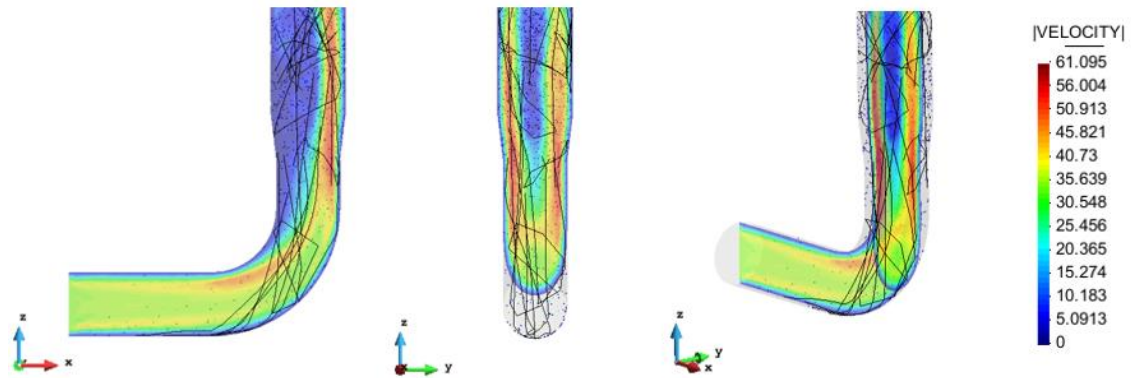


Figura 38. Velocidades y trayectoria partículas en tramo horizontal, codo y ensanchamiento. Descenso partículas.

Tramo vertical ondulaciones

La segunda parte está compuesta por el tramo vertical con ondulaciones. En la *figura 39* se muestran las trayectorias seguidas por las partículas, las cuales poseen velocidades elevadas que algunas son capaces de pasar por el tramo con ondulaciones sin modificar casi su trayectoria. De este modo, son capaces de seguir la corriente principal de aire, y llegar rápidamente al cabezal distribuidor. No obstante, también se observan algunas partículas con velocidades medias-altas, cuyas trayectorias sí se ven modificadas ligeramente por las ondulaciones, tomando forma helicoidal para atravesar este tramo.

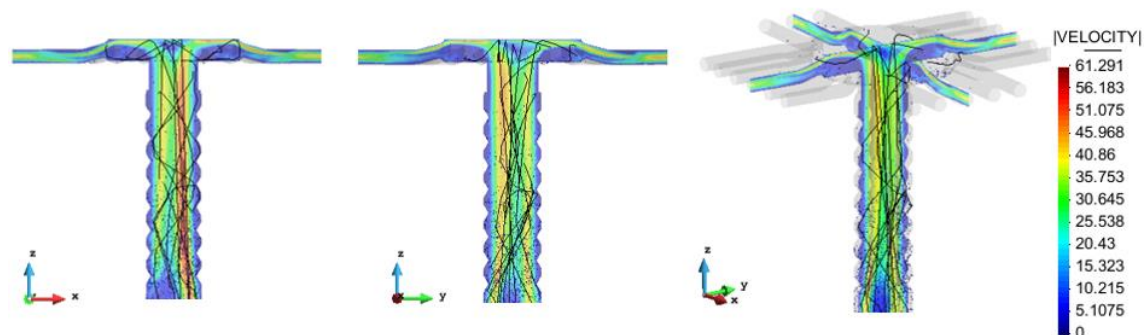


Figura 39. Velocidades y trayectoria partículas en tramo vertical con ondulaciones. Corriente principal.

Como en el tramo anterior, aparecen zonas de turbulencias en las paredes laterales con ondulaciones y velocidades bajas en el centro del elemento. Esta distribución de velocidades contribuye a la generación de trayectorias de partículas aleatorias, las cuales pueden tanto ascender como descender, formando espirales alrededor de la parte central del elemento. Este

fenómeno provoca el incremento del tiempo de residencia de las partículas en interior del elemento y su acumulación.

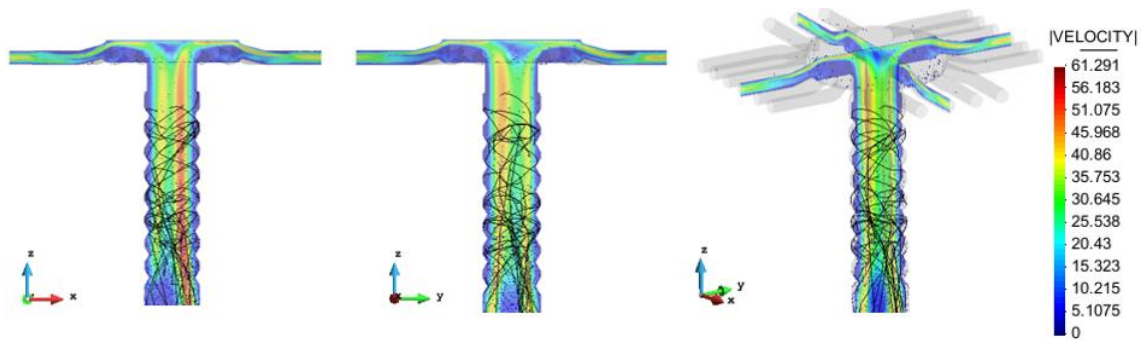


Figura 40. Velocidades y trayectoria partículas en tramo vertical con ondulaciones. Zona turbulencias.

Cabezal circular

Finalmente, se encuentra el cabezal distribuidor con las mangueras de salida conectadas en todo el perímetro. En este tramo se analizan tres casos posibles de las trayectorias seguidas por las partículas.

El primero consiste en la entrada directa de las partículas al cabezal distribuidor desde el tramo vertical. Se puede comprobar que tienden a seguir la distribución de velocidades ya que suben verticalmente y al llegar a la parte superior, estas decaen hacia los lados pudiendo ir a parar directamente a una salida o a la superficie circular inferior del cabezal.

En la figura 41 se observa que la mayor parte de las partículas provenientes del corriente principal de aire rebotan contra la superficie superior y tienden a ir hacia las salidas frontales del elemento. Este fenómeno explicaría la mayor afluencia de partículas en las salidas frontales, coincidiendo con los estudios previos analizados y la experiencia de los fabricantes de esta tipología de máquinas sembradoras. No obstante, como no todas las partículas siguen estrictamente el flujo principal vertical en el tramo de ondulaciones, aparecen rebotes en otras direcciones, distribuyéndose así por todo el cabezal.

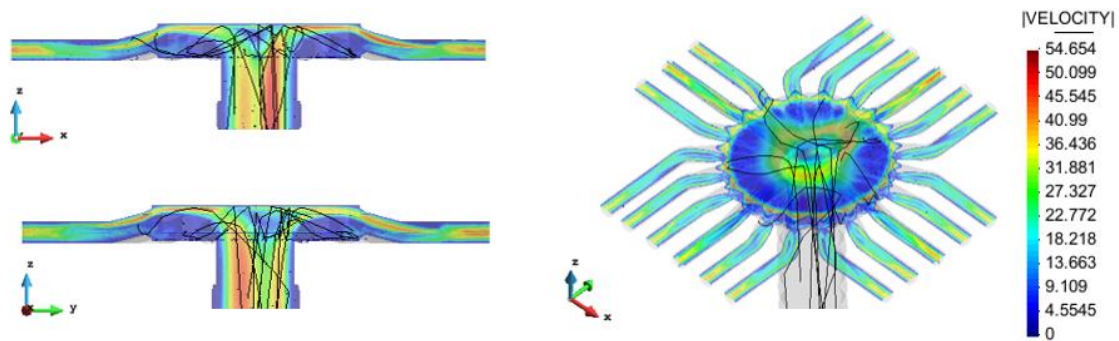


Figura 41. Velocidades y trayectoria partículas en cabezal distribuidor. Corriente principal.

Como se puede observar en la *figura 42*, las partículas en las mangueras de salida pueden llegar directamente desde la entrada del cabezal distribuidor, si disponen de velocidad suficiente, siguiendo la corriente principal de flujo. Una vez en los conductos de salida, las trayectorias seguidas por las partículas pueden ser más rectilíneas o con forma a espiral, tardando más o menos respectivamente.

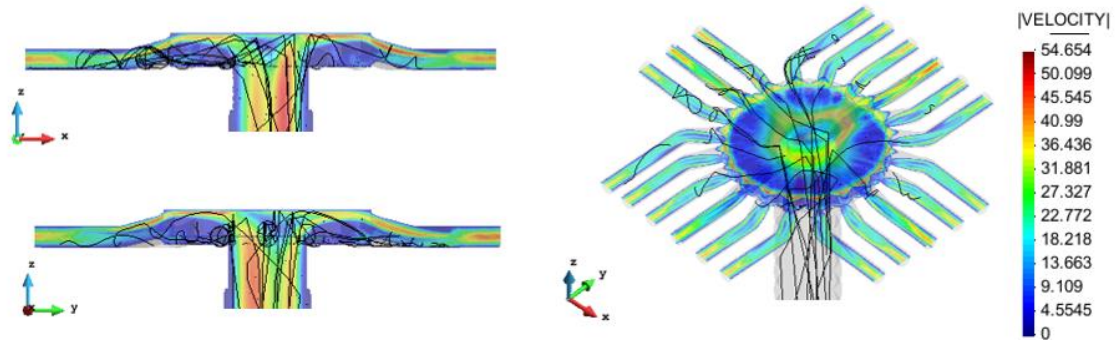


Figura 42. Velocidades y trayectoria partículas en cabezal distribuidor. Salida de partículas.

Otra forma de alcanzar las salidas es con las partículas que caen en la superficie circular inferior del cabezal, ya que las turbulencias que aparecen en estas zonas producen la recuperación del movimiento de las partículas (*figura 43*), permitiendo a estas la posibilidad de su expulsión por los conductos de salida. No obstante, el tiempo de residencia de estas partículas se ve incrementado, generando su acumulación en la zona inferior con la opción de su regreso al tramo con ondulaciones.

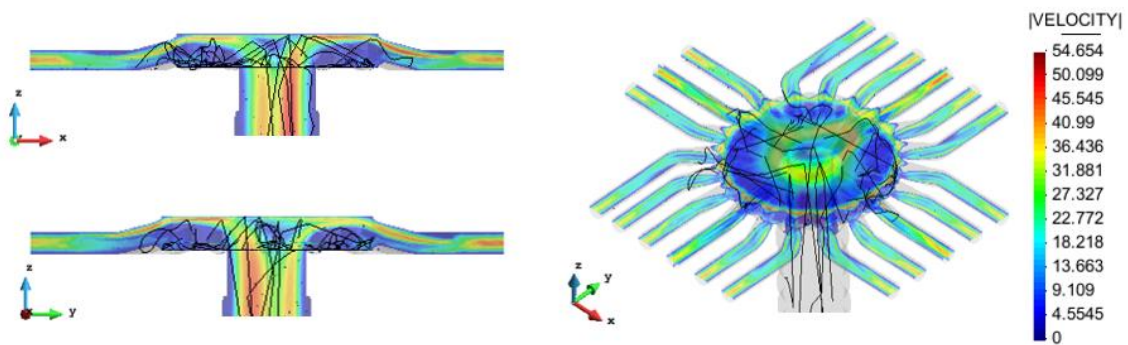


Figura 43. Velocidades y trayectoria partículas en cabezal distribuidor. Zona turbulencias.

3.2.2.5. Salida de partículas

En este apartado se contabiliza la cantidad de semillas salientes por cada una de las mangueras para verificar si la distribución de salida es uniforme en todas éstas, y en caso contrario, conocer por donde tienen más tendencia a escapar.

Según la experiencia de los fabricantes de esta tipología de máquina y los estudios previos examinados, las partículas normalmente tienen una mayor tendencia al escape del cabezal mediante las salidas situadas en la parte frontal (por donde entran al sistema).

Para comprobar si en la simulación también se seguía esta tendencia observada experimentalmente, se han numerado las 20 salidas del elemento analizado, tal y como se muestra en la *figura 44*, y se han contado las partículas expulsadas por cada una de ellas.

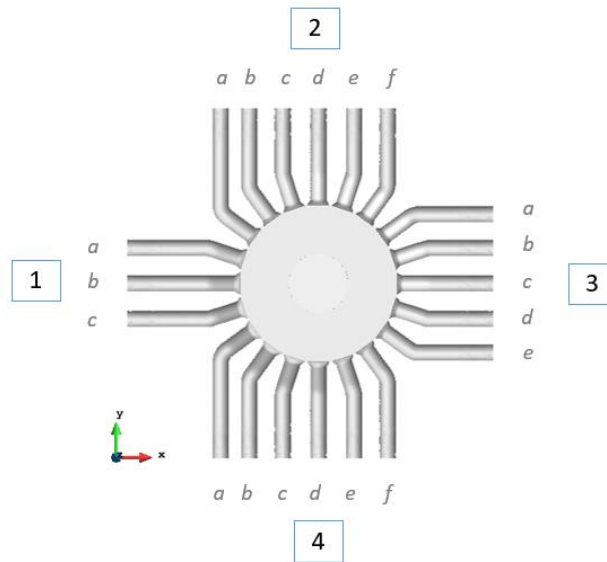


Figura 44. Esquema de numeración de las salidas del cabezal distribuidor.

Para la obtención de los resultados, se ha empleado una simulación con una duración total de dos segundos, durante los que se expulsan 50 partículas.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del recuento de las partículas en las salidas del cabezal.

En el *gráfico 1* se muestra las cantidades de semillas expulsadas por cada una de las mangueras de salida, mientras que en el *gráfico 2* se representa la suma de partículas expulsadas por las salidas situadas en un mismo lado.

A partir de estos, se puede observar que la mayor cantidad de semillas salen del sistema por la parte frontal (salidas del grupo 1), seguida por las del grupo 2. No obstante, hay una gran diferencia en cuanto a la cantidad entre ambos grupos, (el segundo tiene la mitad que el primero). También se observan unas variaciones bastantes notorias principalmente entre las tres salidas del grupo 1, siendo las extremas las más concurridas.

Las salidas menos transitadas corresponden a las del grupo 3, es decir, las situadas en la parte posterior del elemento; seguida por las del 4.

Además, durante el tiempo analizado no se ha producido ninguna expulsión por cuatro de las veinte salidas dispuestas en el perímetro.

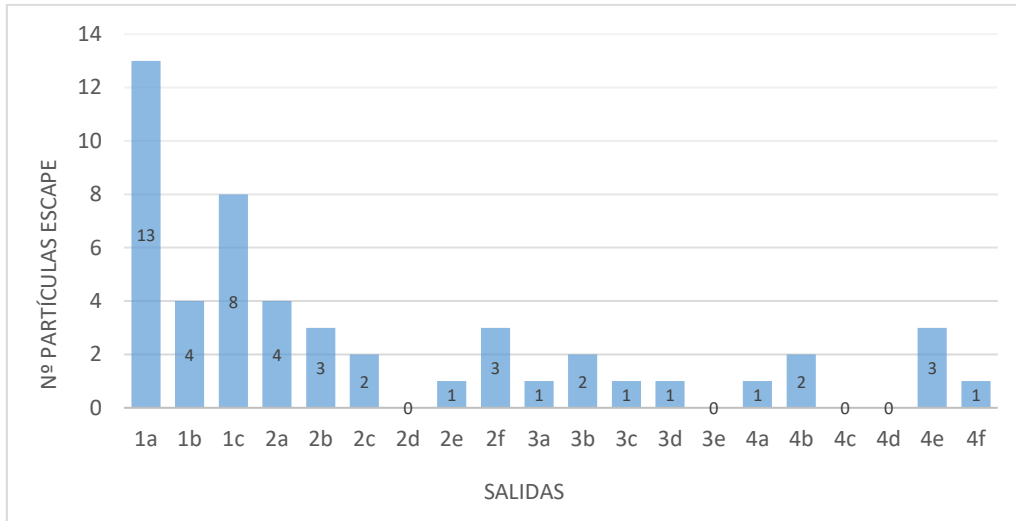


Gráfico 1. Cantidad de partículas expulsadas por cada salida.

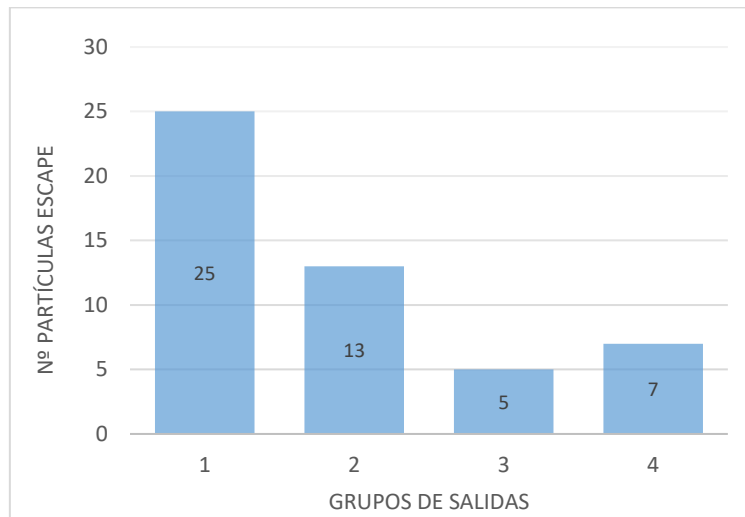


Gráfico 2. Cantidad de partículas expulsadas por cada grupo de salidas.

Finalmente, en el *gráfico 3* se representa la cantidad de partículas expulsadas en cada intervalo de tiempo (medio segundo) y agrupadas en función de los cuatro grupos de bocas de salida.

Mediante este, se puede observar que en el primer intervalo 0-0.5s es donde se produce la menor expulsión de partículas, mientras que en los otros tres las cantidades de partículas expulsadas son parecidas. Esto es debido a la primera fase de arranque de la bomba de aire, donde las partículas empiezan a entrar en el sistema.

Además, se comprueba que en las salidas frontales (grupo 1) es por donde se expulsan más partículas en todos los intervalos de tiempo considerados, seguidas por las del grupo 2. No

obstante, parece que con el paso de tiempo la diferencia entre los cuatro grupos de bocas se vaya reduciendo.

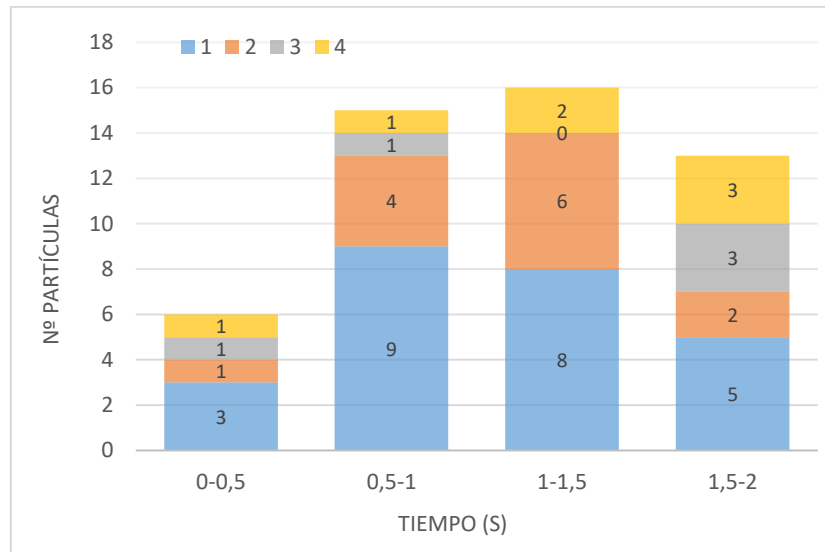


Gráfico 3. Cantidad de partículas expulsadas por intervalos de tiempo, en función del grupo.

3.2.2.6. Conclusiones

Tras el análisis del comportamiento de las partículas y la distribución de velocidades por el paso de las diferentes partes del elemento estudiado, se puede concluir que algunas de las partículas son capaces de seguir de forma bastante aproximada la corriente principal de velocidades desde su entrada al sistema hasta su salida.

No obstante, las zonas con velocidades bajas del aire afectan notablemente a las trayectorias de las partículas, generando formas de espiral. Además, las fuerzas inerciales de las partículas también contribuyen a la creación de trayectorias bastante aleatorias, pudiendo afectar a otras partículas cuyo movimiento se corresponda con la corriente principal. Este fenómeno provoca un aumento del tiempo de residencia de las partículas en el elemento y la aparición de zonas de acumulación de las partículas.

Por lo tanto, se produce un incremento en la densidad de partículas en todo el sistema ya que la cantidad de partículas entrantes se mantiene constante, mientras estas tardan cada vez más en salir. Además, estas zonas de turbulencias y acumulaciones pueden ocasionar el descenso de partículas por el elemento hasta llegar otra vez al flujo principal, permitiendo su ascenso de nuevo.

Se comprueba que el tramo con ondulaciones permite una dispersión de partículas considerable entre la entrada y la salida, quedando estas mejor repartidas para su llegada en el cabezal circular, como pasaba con la distribución de velocidades.

En la entrada del cabezal, en un primer momento se observa una tendencia de las partículas a ir hacia las mangueras frontales del elemento (por donde entran las partículas), es decir, siguiendo la corriente principal de flujo. No obstante, esta tendencia de las partículas parece disiparse con el paso del tiempo aunque de modo fallido.

Finalmente, se podría concluir que las trayectorias seguidas por las partículas se corresponden bastante bien a la distribución de velocidades en el elemento. Por un lado, aparecen zonas de partículas con velocidades más elevadas, siguiendo una trayectoria más directa como si de la corriente principal se tratase. Mientras que en las zonas con velocidades muy bajas aparecen turbulencias de las partículas, las cuales acaban teniendo una cierta tendencia a descender hasta encontrar otra vez la corriente principal. De este modo, se concluye que el comportamiento entre las dos fases es muy similar, pero en el caso de las partículas el tiempo de residencia en el elemento es muy variado.

CAPÍTULO 4:

PROPUESTA DE ALTERNATIVAS AL DISEÑO ACTUAL

4.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se proponen tres variaciones de la geometría del elemento distribuidor y se analizan las velocidades del flujo para conocer cómo se ve afectado por las modificaciones realizadas. Intentando así, hallar una geometría que proporcione unos resultados mejores a la solución actual.

Las diferentes geometrías propuestas se han escogido teniendo presente el comportamiento del flujo en la geometría de referencia analizada en el capítulo anterior. Además, las modificaciones efectuadas solo se han centrado en la parte del conducto, manteniendo en todos los casos la misma geometría del cabezal distribuidor.

Para poder comparar los resultados con la geometría de referencia analizada previamente, se ha utilizado exactamente la misma estrategia de cálculo, es decir, con los mismos tamaños de malla, condiciones de contorno, pasos de tiempo, etc., en todas las nuevas geometrías.

En este capítulo solamente se analiza el comportamiento de velocidades del fluido, ya que tal y como se ha mostrado en el capítulo anterior, las partículas tienden a seguir la misma distribución que el flujo de aire con pequeñas variaciones globales.

4.2. MODELO “MICHELIN”

Al observar en el capítulo anterior que el tramo con ondulaciones es muy importante para la uniformización de velocidades en la sección anterior al cabezal circular, se ha decidido modificar el elemento distribuidor de partida alargando el tramo con ondulaciones en toda la longitud vertical. De esta forma, se podrá conocer mejor el efecto que tienen las ondulaciones en el conducto en la distribución de velocidades.

Para referirse a esta geometría modificada se le ha puesto el alias de “Michelin” debido al parecido de las ondulaciones con el muñeco de los neumáticos de esta marca.

4.2.1. Geometría

A continuación se muestran las dos vistas principales del elemento correspondientes al elemento a estudiar. Se puede observar que, respecto al caso de referencia, solo se ha substituido la parte del ensanchamiento por ondulaciones, incrementado así la longitud de estas.

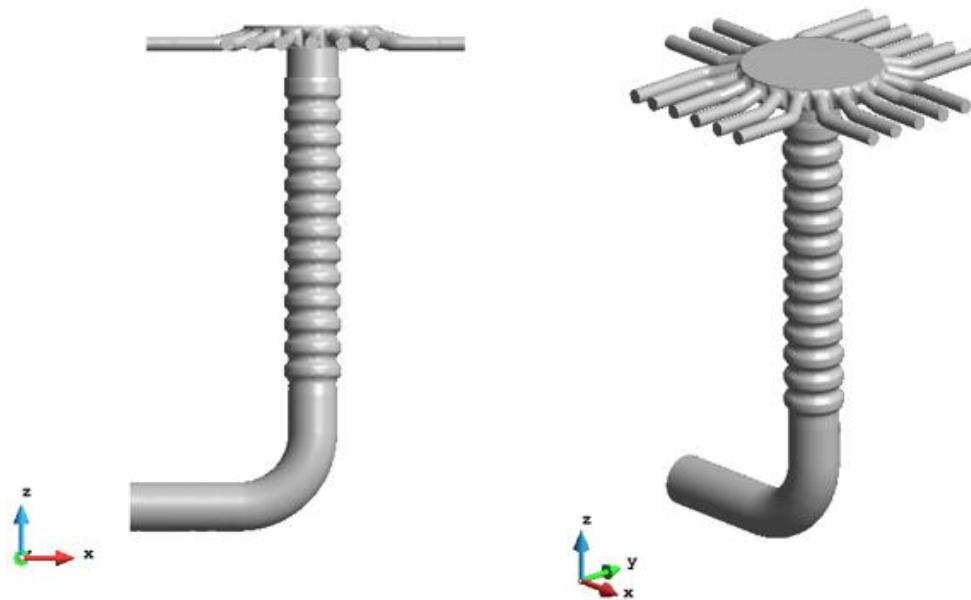


Figura 45. Geometría del modelo “Michelin”.

4.2.2. Resultados

4.2.2.1. Determinación estado estacionario

Previamente a proceder al análisis exhaustivo de la distribución de velocidades, se analiza de forma global las secciones más representativas del elemento para conocer a partir de que instante aparece la estacionalidad del flujo.

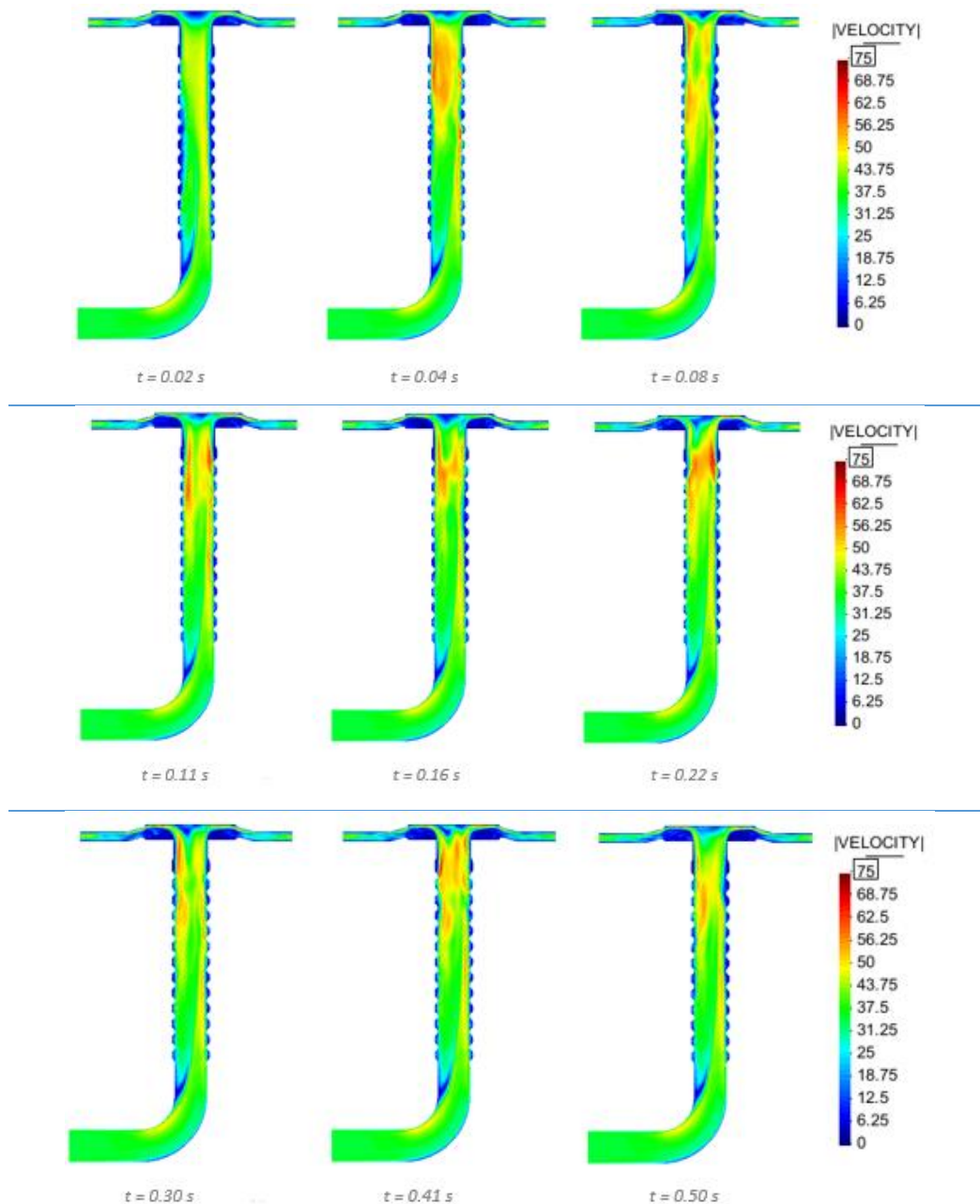


Figura 46. Distribución de velocidades en la sección principal representativa. Modelo “Michelin”.

La evolución del comportamiento del flujo en diferentes pasos de tiempo, mostrada en la *figura 46*, permite ver una posible estacionalidad del flujo en la primera mitad del elemento en los primeros instantes de simulación; consistente en la formación de una corriente principal que empieza en la parte interior del codo, que al llegar al tramo con ondulaciones, esta se sitúa en la parte posterior del elemento.

Por otro lado, a partir de la mitad superior del tramo con ondulaciones se producen unas variaciones mayores entre velocidades con el paso de tiempo, probablemente debidas a las turbulencias generadas por este tramo. No obstante, estos cambios en velocidades consisten en un incremento de estas en la parte superior, formándose como si de oleadas se trataran.

También se observa una pequeña zona siempre presente de velocidades muy bajas en la parte interior de la salida del codo.

Al producirse variaciones en la entrada al cabezal, en la *figura 47*, se muestran las secciones horizontales para conocer el comportamiento del flujo en esta parte.

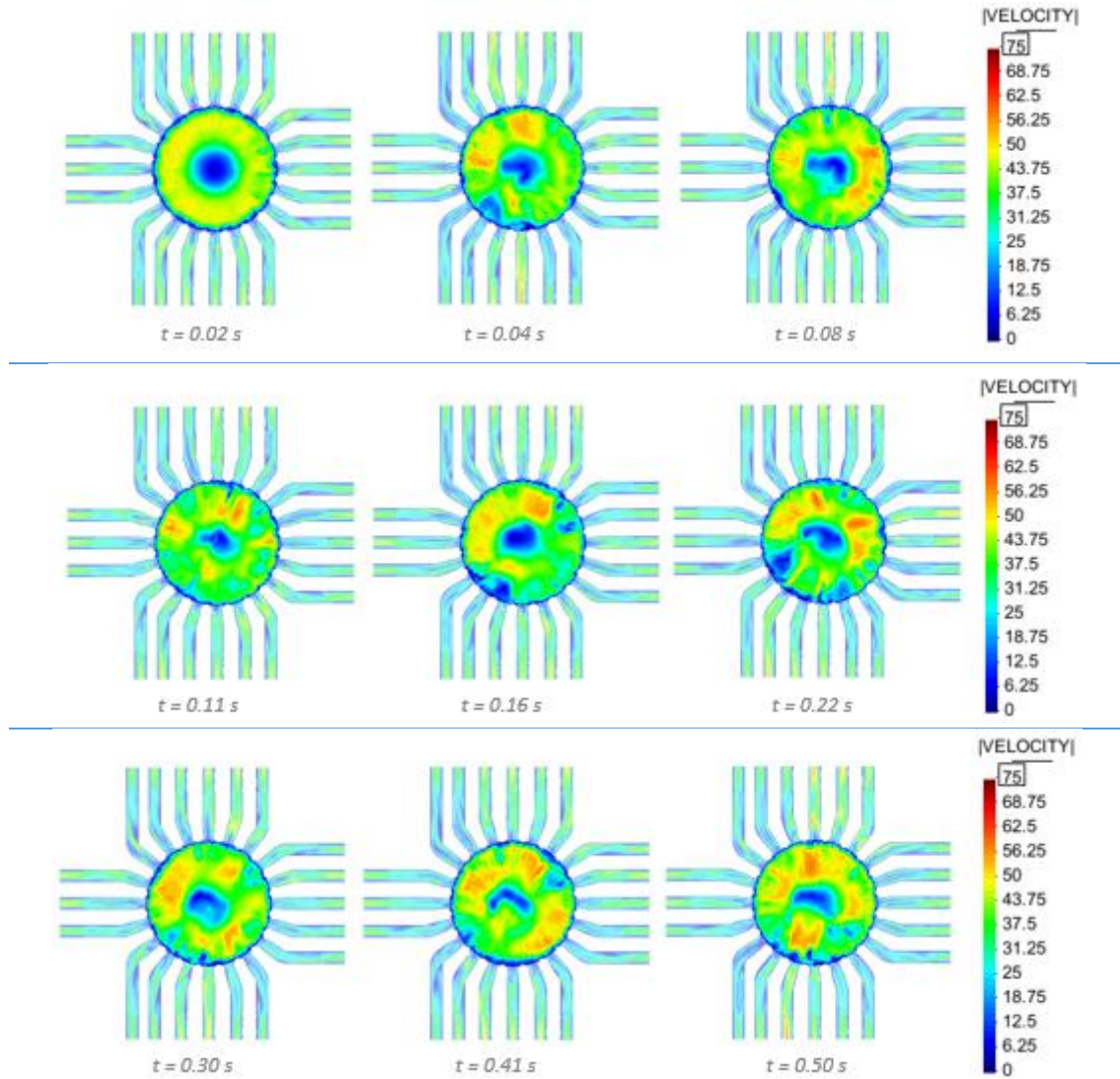


Figura 47. Distribución de velocidades en el cabezal superior. Modelo "Michelin".

Se puede observar que evidentemente se producen variaciones en la distribución de velocidades en la parte superior del cabezal. De modo que, partiendo de una base bastante uniforme de velocidades, con el paso de tiempo se producen zonas con valores más elevados las cuales parecen ir moviéndose circularmente por todo el perímetro a medida que transcurre el tiempo. No obstante, también se crean pequeñas zonas de turbulencia en algunos instantes.

4.2.2.2. Análisis de velocidades.

Seguidamente se analizará el comportamiento del flujo en el interior del elemento usando el tiempo $t=0.30s$, considerado un instante suficientemente representativo durante el funcionamiento de la máquina, a pesar de no haber logrado un estado completamente estacionario.

Global

Primero se realiza un análisis global de las velocidades mediante las dos secciones verticales principales del elemento mostradas en la *figura 48*, para poder tener una idea general del comportamiento del fluido en todo el elemento.

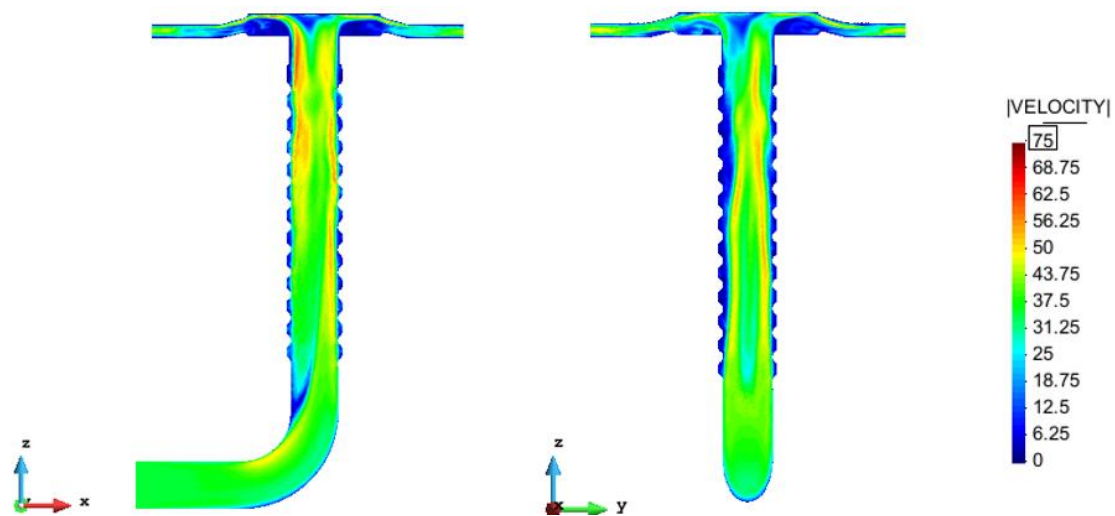


Figura 48. Distribución de velocidades en las dos secciones verticales principales. Modelo "Michelin".

A partir de estas secciones, se puede comprobar la aparición de una corriente principal debida al cambio de dirección del codo. Esta se empieza a formar en la parte interior del codo, seguido por un ascenso hasta alcanzar la pared posterior del elemento del tramo vertical en la salida del codo.

A causa del recorrido tomado por la corriente principal, se observa la creación de una pequeña zona de turbulencias en el punto donde se separa del interior del codo. No obstante, al haber a continuación un tramo corto recto y seguidamente el de ondulaciones, esta no se puede agrandar sino que parece dispersarse con las turbulencias generadas en el tramo con ondulaciones.

La distribución de velocidades en el tramo con ondulaciones es similar a la formada en la geometría de referencia, ya que aparecen velocidades superiores en la pared posterior y

laterales del elemento. Además, se ha visto que en la parte frontal superior del tramo aparecen velocidades altas con el paso de tiempo, como si de rachas de aire se trataran.

Mediante las secciones verticales, se comprueba que en la entrada del cabezal distribuidor el comportamiento seguido por el flujo es también muy similar al de la geometría de referencia; con la ascensión vertical y posterior descenso hacia las mangueras de salida, resultando una forma parecida a la de una ola.

Finalmente, se podría concluir que al tratarse de un elemento con una geometría parecida a la de referencia, viéndose solamente incrementada la longitud del tramo de ondulaciones, se puede comprobar que las distribuciones de velocidades resultantes son muy similares en los dos casos. No obstante, una diferencia relevante es la dispersión de la corriente principal en la parte superior del tramo con ondulaciones, y la menor afectación del codo al formar la corriente principal, sin la aparición de una zona de turbulencias tan grande.

Seccional

En esta parte se analiza la distribución de velocidades del flujo mediante diferentes secciones transversales repartidas estratégicamente por todo el elemento de estudio. Estas servirán para conocer mejor el flujo en el interior del conducto. En la *figura 49* se muestra un esquema de las secciones estudiadas.

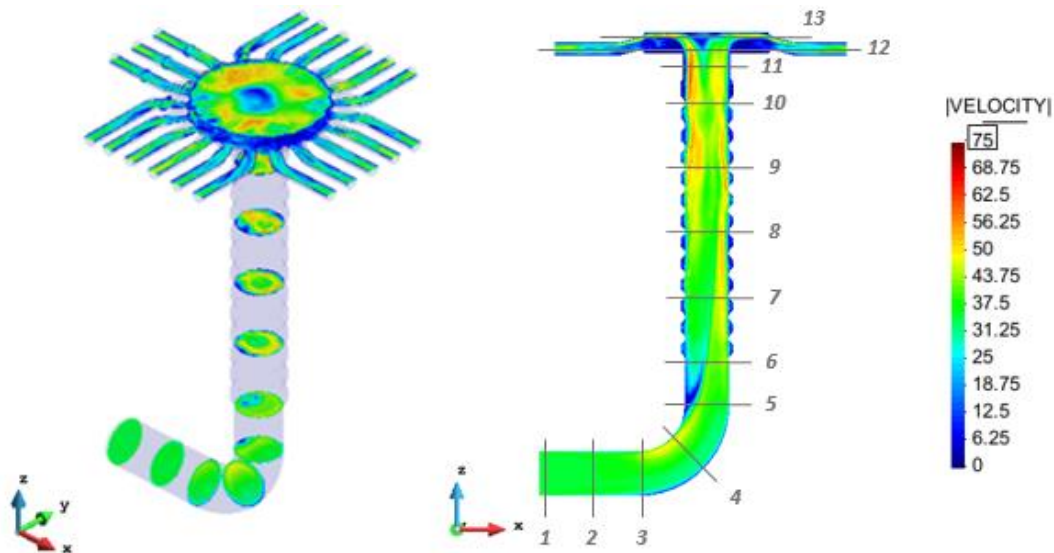


Figura 49. Esquema secciones de estudio. Modelo "Michelin".

Los resultados de las velocidades en las secciones transversales se muestran en dos figuras diferentes consecutivas para facilitar su análisis.

El primero grupo de secciones corresponde a la parte inicial del elemento hasta la salida del codo. Mediante la figura 50 se puede conocer mejor la aparición de la zona con velocidades bajas en la pared frontal, coincidiendo con el despegue de la corriente principal del interior del codo. Además, se observa que a medida que las velocidades elevadas se acercan a la parte posterior del elemento, las bajas van desplazándose de la misma forma hacia el interior del conducto.

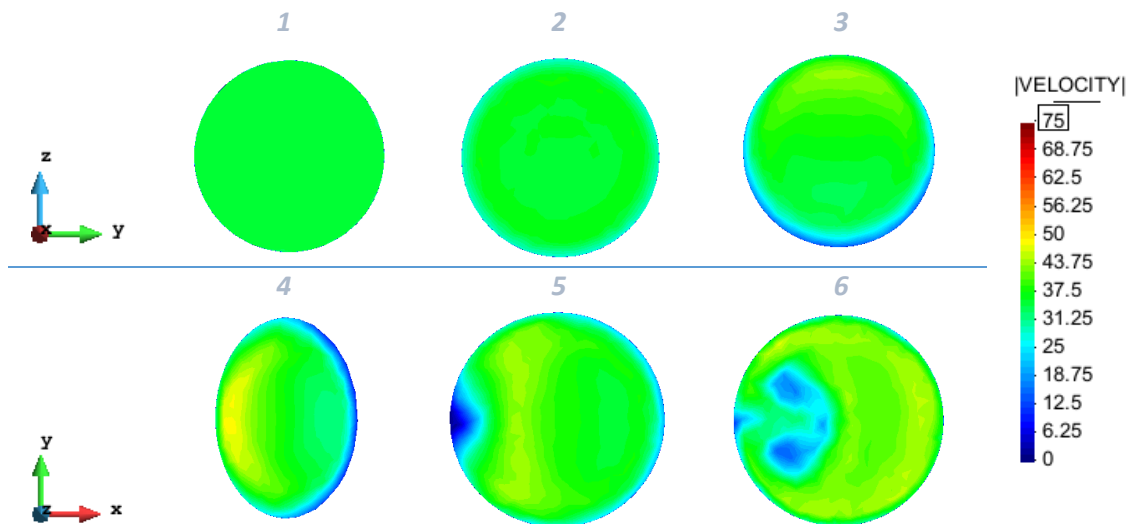


Figura 50. Distribución velocidades en secciones mitad inferior. Modelo "Michelin".

En la segunda parte del elemento (figura 51) compuesto por el tramo vertical con ondulaciones y el cabezal distribuidor, se observa que en la entrada la distribución de velocidades toma la forma de una "C" invertida recordando a los resultados de la geometría de referencia. Con la diferencia que en este caso la forma no se encuentra tan bien definida, cerrándose durante su avance por el conducto hasta llegar a un poco más de la mitad, donde evoluciona en una especie de círculo.

De esta forma, la distribución de velocidades conseguida en las secciones superiores del conducto vertical parecen que buscan una simetría y homogeneidad pero sin acabar de lograrla del todo.

Por último, cabe resaltar la similitud entre la sección de entrada y la superior del cabezal distribuidor, ya que parece existir una cierta correspondencia entre las zonas con valores más elevados de velocidades.

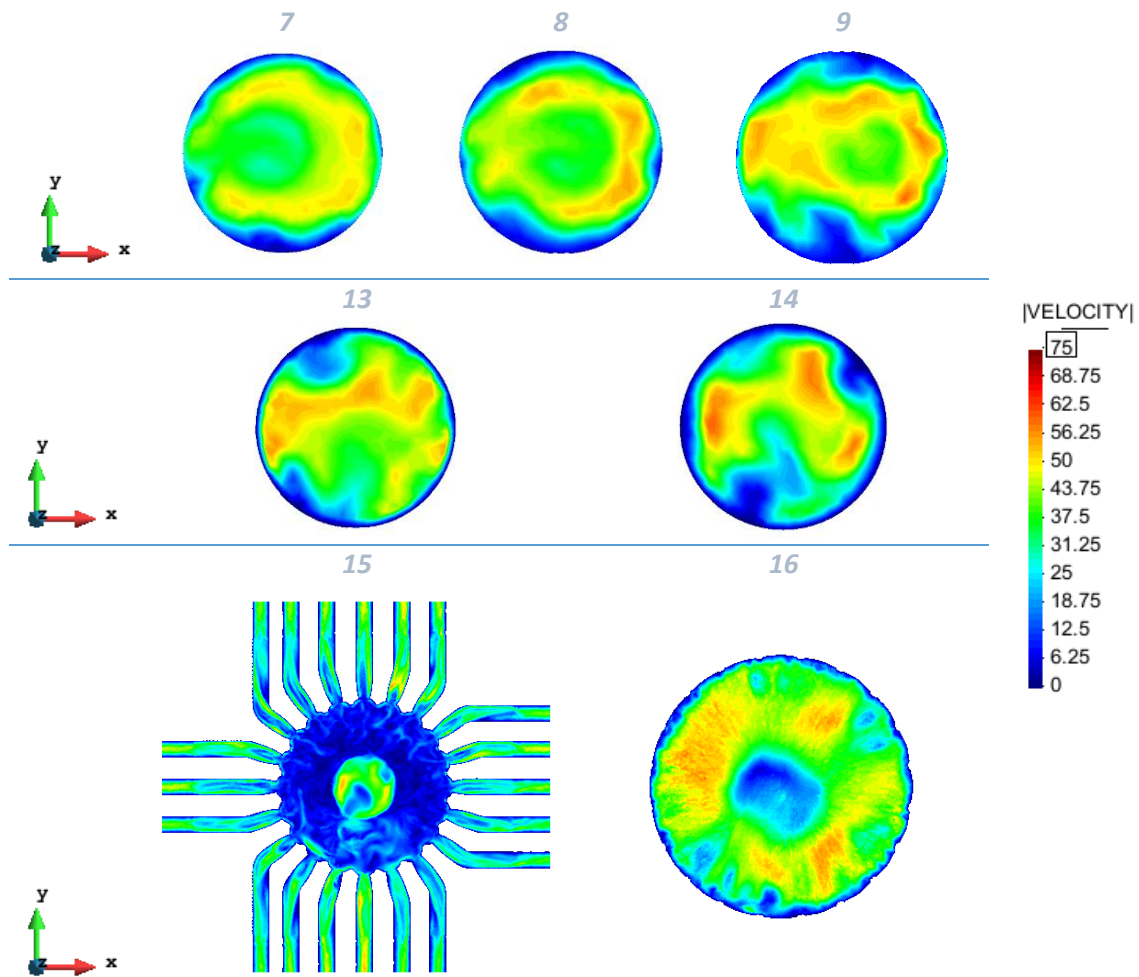


Figura 51. Distribución velocidades en secciones mitad superior. Modelo "Michelin".

4.2.3. Conclusiones

A partir del análisis realizado del comportamiento del flujo por las distintas partes del elemento, se concluye que la prolongación del tramo con ondulaciones es favorable para la uniformización del flujo en la sección superior del conducto vertical, proporcionando una base bastante satisfactoria para la posterior entrada al cabezal circular. Ya que como se ha comentado en el apartado de estudios previos y mediante las simulaciones numéricas, la distribución de salida de las partículas depende fuertemente de esta sección de entrada.

De este modo, a pesar de crearse zonas con velocidades más elevadas en la parte superior del elemento, al ir moviéndose rápidamente por todo el perímetro, da la sensación de obtener una distribución final bastante homogénea. Respecto a las partículas, este comportamiento del flujo podría influir positivamente, permitiendo su mayor impulso hacia diferentes direcciones en cada instante de tiempo.

Además, se comprueba que con ondulaciones en todo el conducto vertical, el comportamiento del flujo en la salida del codo se ve modificada sin dar lugar a grandes zonas con velocidades muy bajas. Contribuyendo así, a la obtención de una distribución de velocidades más uniforme en las secciones ya que se logra una mejor dispersión del corriente principal.

Pensando en el comportamiento de las partículas en el interior del elemento, se podría intuir que ha habido una cierta mejora en la unión del codo con el tramo vertical, ya que la zona de velocidades bajas ha disminuido considerablemente respecto a la geometría de referencia. Por lo tanto, este fenómeno podría suponer una mayor facilidad de las partículas para ascender siguiendo la corriente principal; ya que al ocupar una mayor sección, será más difícil su desvío y entrada a la zona de velocidades bajas, lo que provocaría una acumulación de semillas en esta zona.

4.3. MODELO “MONGETA”

La idea de la geometría de este modelo también surgió al analizar los resultados obtenidos con la geometría de referencia; ya que se observó que en el tramo del ensanchamiento situado a la salida del codo se forma una corriente principal en forma de “C” invertida, dejando la parte frontal del elemento con zonas con turbulencia, tal y como se ha mostrado anteriormente.

Por lo tanto, para evitar la aparición de velocidades bajas que permitan la decaída y acumulación de partículas, se ha decidido cambiar la sección circular del ensanchamiento por una con forma similar a la corriente principal formada.

El alias utilizado para referirse a esta geometría es “Mongeta”, ya que la forma resultante de la nueva sección a disponer recuerda la una alubia, que en catalán se dice “mongeta”.

4.3.1. Geometría

Como se puede observar en la *figura 52*, esta geometría ha consistido en cambiar la sección circular del ensanchamiento dispuesto en la geometría de referencia por una sección en forma de alubia inscrita en la circunferencia de la inicial. Además, se ha dispuesto de un pequeño tramo de transición en los dos extremos de este para juntarlo correctamente con el codo por la parte inferior, y las ondulaciones por la superior.

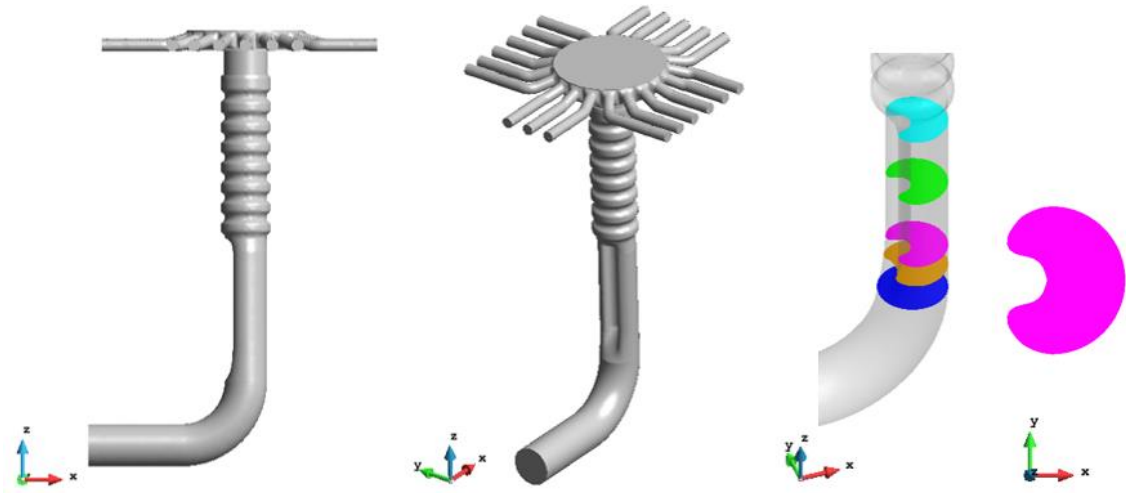
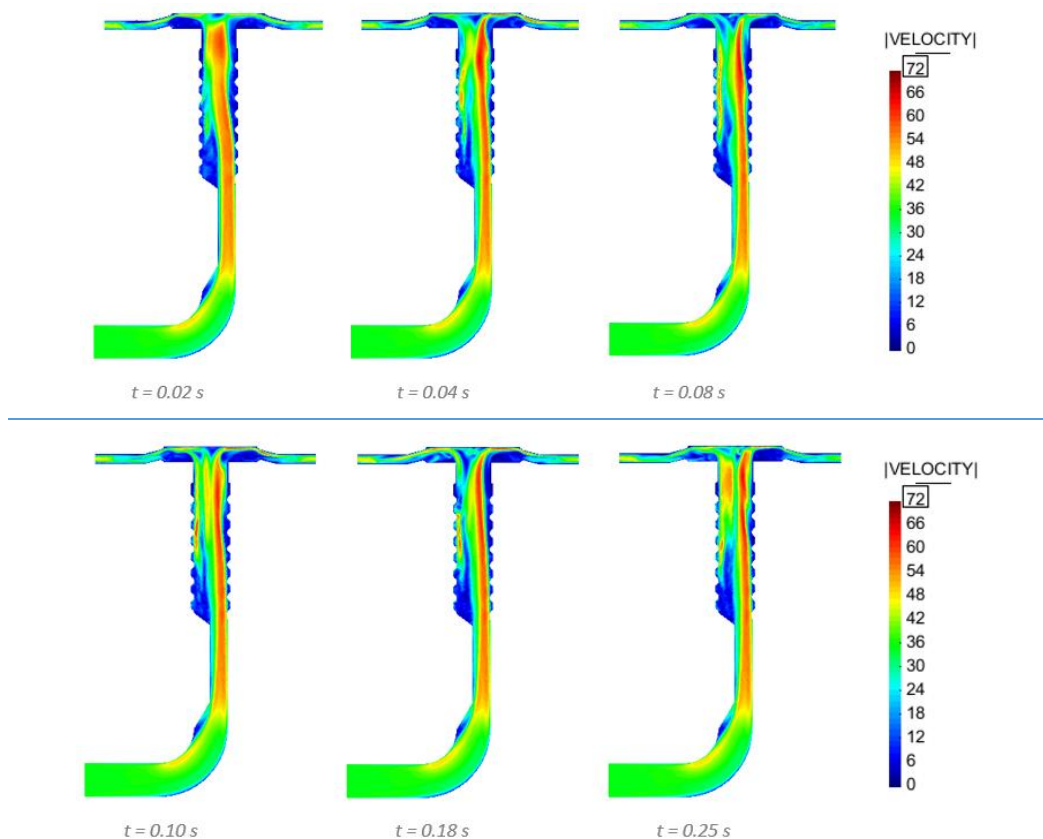


Figura 52. Geometría del modelo "Mongeta".

4.3.2. Resultados

4.3.2.1. Determinación estado estacionario

El primer paso para el análisis de los resultados es determinar a partir de qué momento el flujo entra en un estado aproximadamente estacionario. En la *figura 53*, se muestra la distribución de velocidades en una de las secciones verticales más representativas del elemento para diferentes instantes de tiempo.



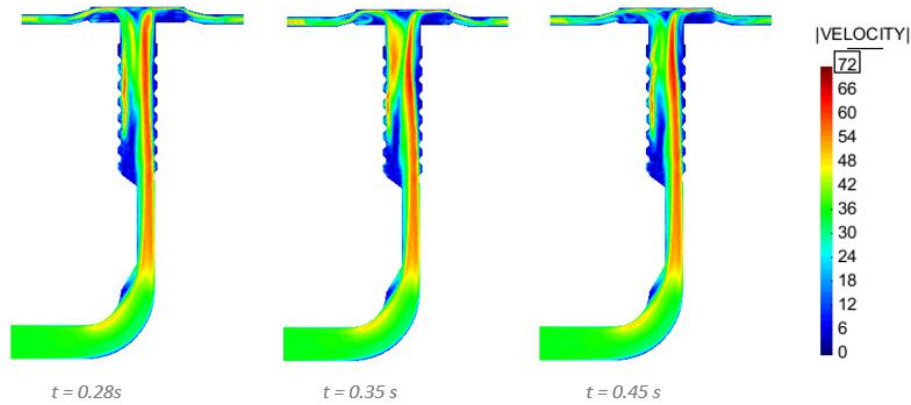
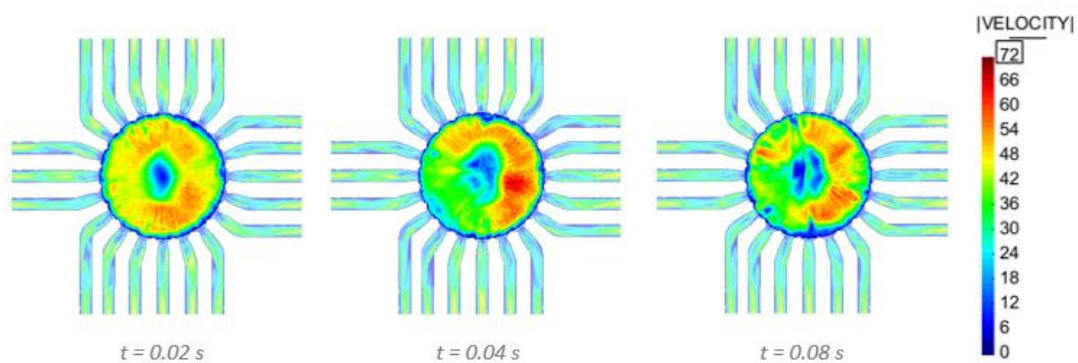


Figura 53. Distribución de velocidades en la sección principal representativa. Modelo “Mongeta”.

A partir de la *figura 53*, se observa que en la parte inferior del elemento, antes de llegar al tramo con ondulaciones, el flujo parece estabilizarse en los primeros instantes de tiempo. Creándose una corriente principal vertical en la salida del codo en la parte posterior del elemento, muy similar a la geometría de referencia, pero sin la aparición de zonas de turbulencia en este primer tramo.

Por el contrario, la distribución de velocidades en la mitad superior va variando de forma significativa de un paso de tiempo a otro, con el intento de la formación de otra corriente principal en la parte frontal del tramo con ondulaciones y su posterior desaparición. Provocando además, cambios en la distribución de velocidades del cabezal circular.

Para tener un conocimiento mejor de lo que sucede en la parte superior del elemento, en la *figura 54* se muestra la sección horizontal superior del cabezal en diferentes instantes de tiempo.



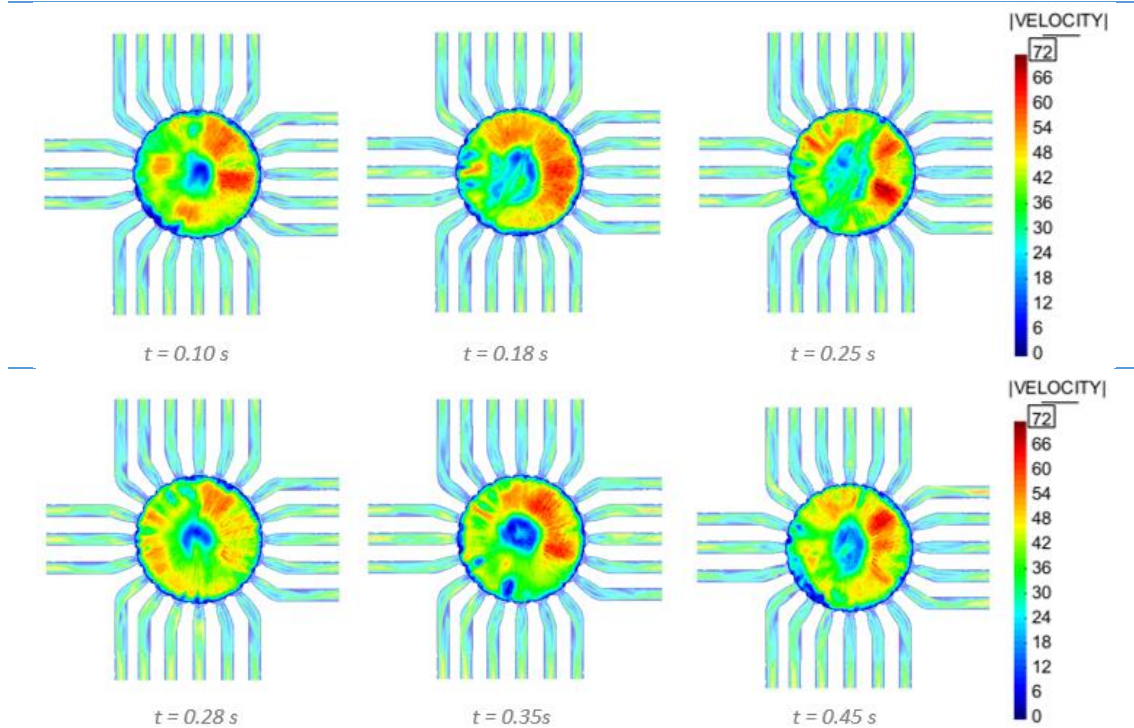


Figura 54. Distribución de velocidades en el cabezal superior. Modelo "Mongeta".

Gracias a estos cortes horizontales del cabezal se puede comprobar que efectivamente se producen unas variaciones significativas en la distribución de velocidades con el paso del tiempo. Además, la diferencia de velocidades en la sección para un mismo instante de tiempo es bastante grande, ya que pueden aparecer zonas con la misma proporción de valores altos y medios, con algunas zonas menores de velocidades bajas. Otro aspecto relevante es que no se observa el seguimiento de ningún patrón en concreto.

4.3.2.2. Análisis de velocidades

A pesar de la no estacionalidad del flujo en todo el elemento, a continuación se analizan las velocidades en el instante $t=0.25s$ para poder conocer mejor el comportamiento del flujo ante la geometría modificada, primero de forma global y posteriormente con el análisis de diferentes secciones transversales.

Global

Para el análisis global de velocidades se estudian las distribuciones obtenidas de las dos secciones principales verticales del elemento, figura 55.

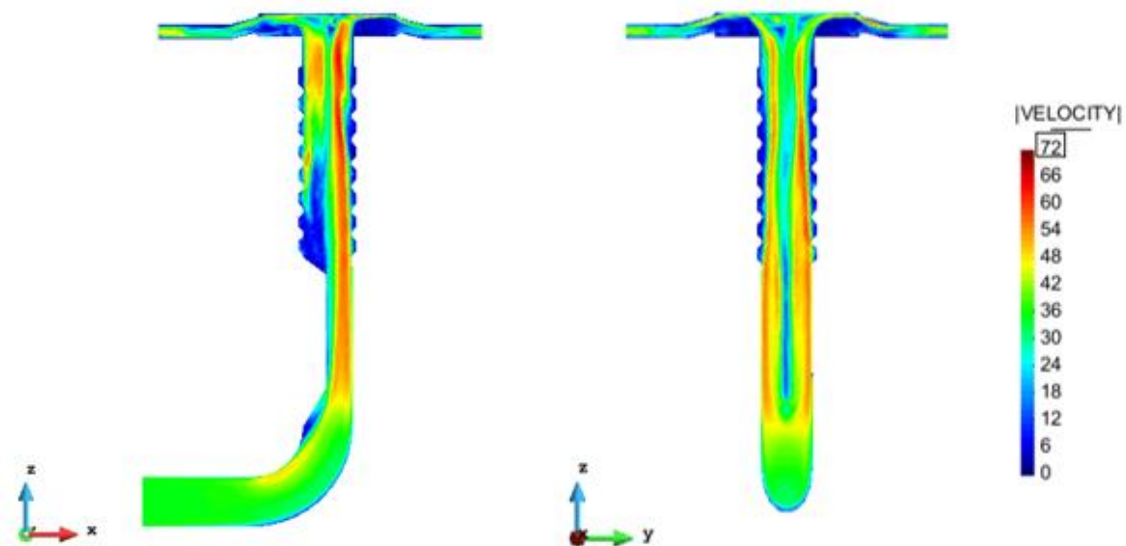


Figura 55. Distribución de velocidades en las dos secciones verticales principales. Modelo "Mongeta".

Estas secciones muestran la aparición de una corriente principal, la cual se empieza a formar en la parte interior del codo y sigue subiendo verticalmente por la pared posterior del elemento. No obstante, se puede observar una zona de velocidades bajas casi nula en la junta interior de la salida del codo con el inicio del tramo en forma de alubia.

Al llegar al tramo con la geometría modificada en forma de alubia se produce un aumento de velocidades uniforme en la mayor parte de la sección, exceptuando en la parte central, donde ha sido modificada la geometría.

En la parte frontal del inicio del tramo con ondulaciones se observa una zona considerable donde aparecen velocidades bajas, probablemente debido al cambio brusco en la geometría de la sección. Por otro lado, la corriente principal se mantiene de forma bastante fija en la pared posterior con un aumento de velocidades durante el paso por este tramo; y además, en las paredes laterales parece que la sección de velocidades máximas se reduzca y que aparezcan velocidades menores en el centro del conducto. Este fenómeno podría ser causado por las turbulencias generadas por los diferentes anillos del tramo.

El comportamiento del flujo en la entrada del cabezal también es parecido al de la geometría de referencia, accediendo verticalmente hasta topar con la superficie superior donde se desvía su trayectoria y asciende para encontrar la salida más próxima. No obstante, como en la entrada del cabezal las velocidades son heterogéneas en la sección, en la parte superior también lo son y varían en cada instante de tiempo.

Seccional

A continuación se muestran diferentes secciones transversales dispuestas a lo largo del elemento de estudio para poder mostrar más claramente el comportamiento del fluido en el interior del conducto. La *figura 56* presenta un esquema de la disposición de las secciones elegidas para el análisis.

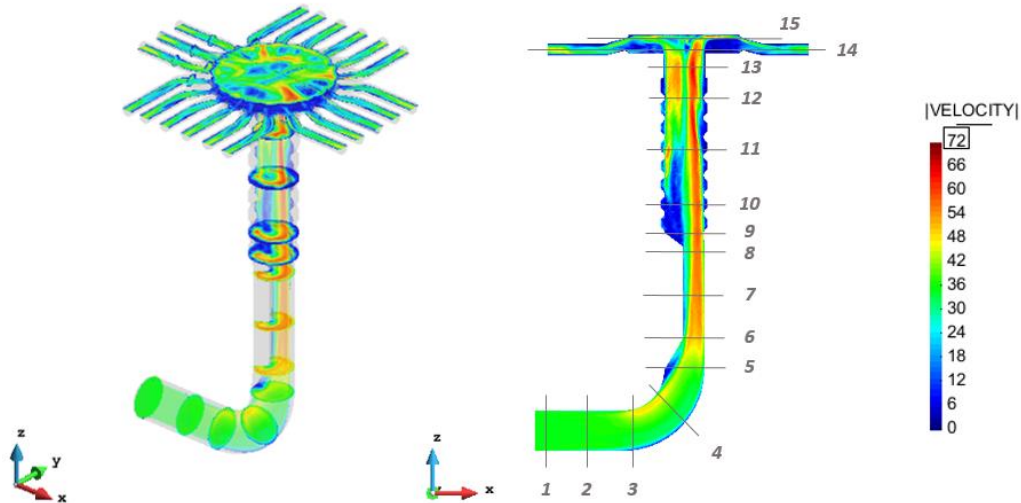


Figura 56. Esquema secciones de estudio. Modelo "Mongeta".

Como se ha dicho anteriormente, la distribución de velocidades en la mitad inferior del elemento, hasta el inicio del tramo con ondulaciones, se mantiene constante en el tiempo. Este fenómeno permite analizar de manera más certera el efecto que tiene la modificación en la geometría de este modelo.

En la *figura 57* se puede observar las secciones correspondientes a esta primera mitad estacionaria del flujo. En la parte del codo se comprueba que las velocidades más elevadas se dan en el interior del giro, con su posterior despegue hacia la pared posterior. Al pasar de forma abrupta de una sección circular a la de alubia, es donde aparecen velocidades bajas muy concentradas en una zona pequeña de la parte frontal.

Se comprueba que gracias a la forma escogida para la nueva geometría, adaptándose a la corriente principal, no aparecen zonas de velocidades muy bajas. No obstante, en la unión entre la sección en forma de alubia con el tramo de ondulaciones, vuelve a crearse una zona turbulenta en la pared frontal del elemento.

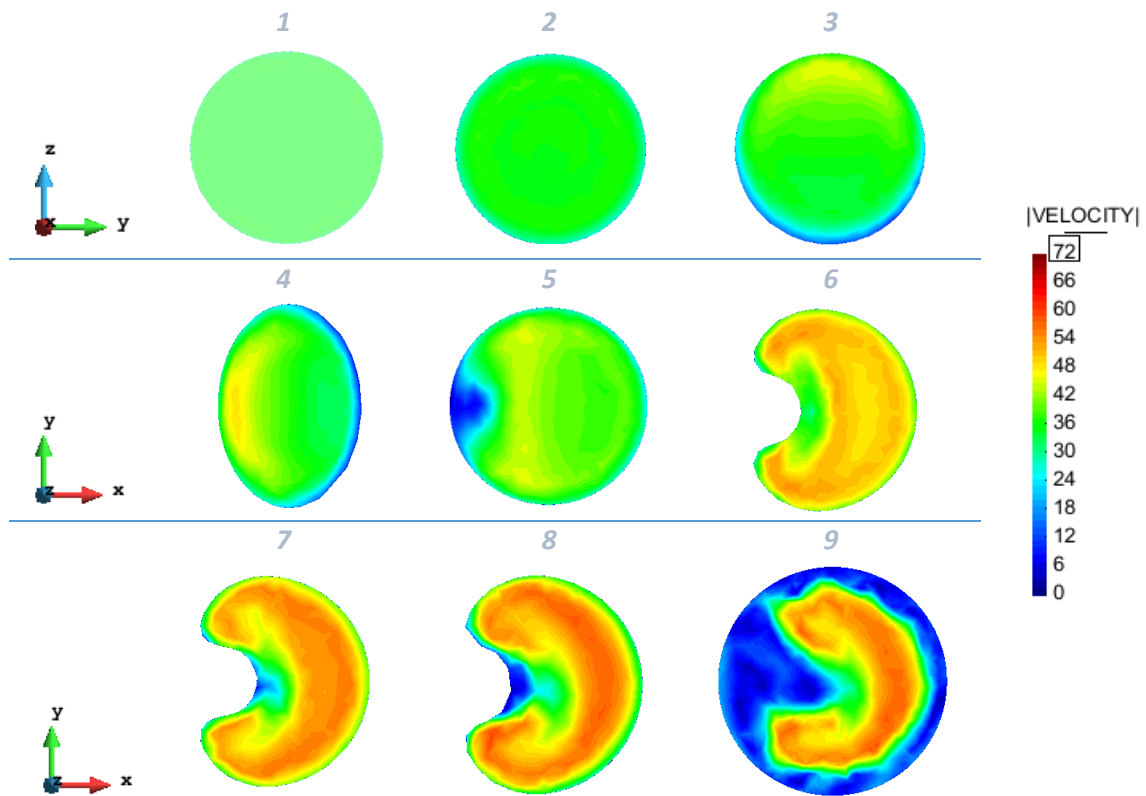
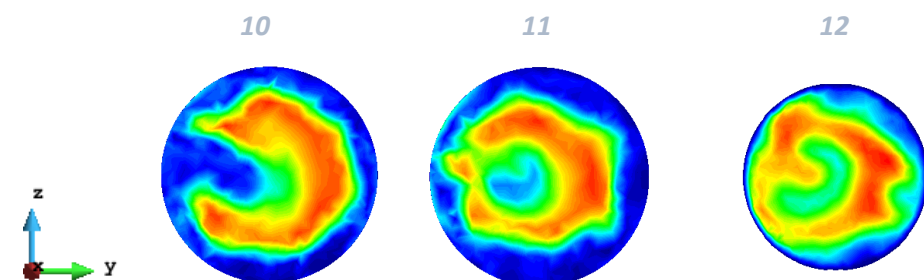


Figura 57. Distribución velocidades en secciones mitad inferior. Modelo "Mongeta".

En el tramo con ondulaciones (*figura 58*) se producen zonas de velocidades bajas en el centro y en el perímetro; partiendo de una especie de "C" en el inicio que se intenta cerrar a lo largo de su recorrido por este tramo para llegar a convertirse en un círculo, tal y como sucedía en la geometría de referencia. No obstante, como se ha dicho anteriormente, esta distribución no es muy representativa ya que varía notablemente entre los diferentes pasos de tiempo.

Finalmente, en el cabezal circular se puede observar que en este instante de tiempo estudiado la distribución de velocidades no es uniforme en la entrada de este, y por lo tanto, tampoco lo es en su interior ni en la salida.



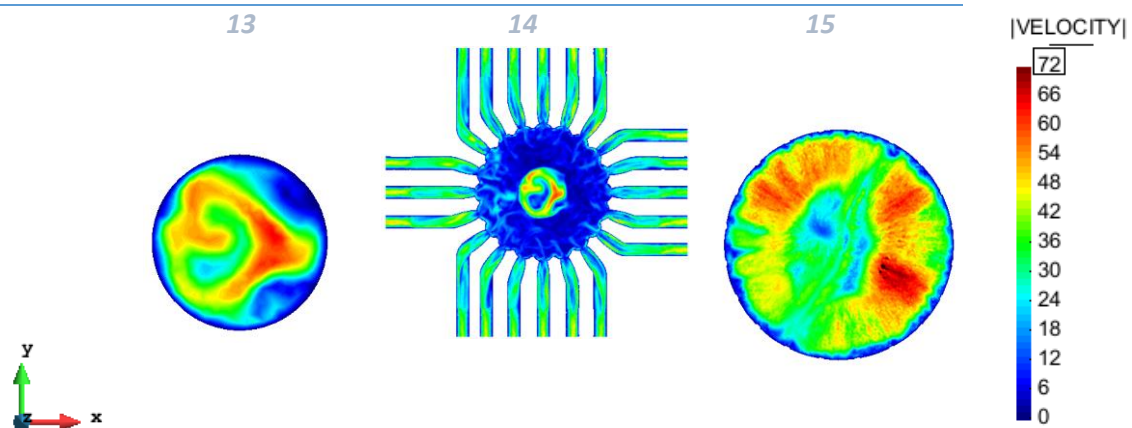


Figura 58. Distribución velocidades en secciones mitad superior. Modelo "Mongeta".

4.3.3. Conclusiones

Una vez concluido el análisis del comportamiento del flujo en el interior del elemento con geometría "Mongeta", se puede decir que de forma general no se han obtenido muy buenos resultados, pero localmente sí.

Por un lado, al no llegar a un estado estacionario en la parte superior del elemento, existe una variación constante en la distribución de velocidades en el interior del cabezal circular. Este fenómeno se traduce en un movimiento bastante caótico e inestable del flujo en el cabezal distribuidor, siendo demasiado heterogéneo en el tiempo. De modo que si al final de la simulación se contaran las partículas en cada una de las mangueras de salida quizá darían valores parecidos, pero estas habrían salido en oleadas, cosa que tampoco es conveniente para la correcta siembra de semillas.

Por el otro lado, se ha comprobado que en el tramo con la geometría modificada en forma de alubia, introducido después del codo, casi no se han creado zonas con velocidades bajas; solamente han aparecido en las dos uniones con la resta del elemento, producidas probablemente por los saltos bruscos en la geometría realizada.

De este modo, contrariamente de lo ocurría en el caso de referencia, se intuye que las partículas subirían de forma bastante directa, siguiendo la corriente principal, hasta el tramo con ondulaciones. Pudiéndose tratar de un punto de no retorno de partículas, ya que al no haber velocidades bajas en el tramo de la sección en forma de alubia, la mayoría de las partículas descendentes debido a las turbulencias en el tramo de ondulaciones rebotarían en el cambio de sección y probablemente volverían a ascender por el flujo vertical principal. Este fenómeno podría tratarse de una posible mejora en el elemento distribuidor.

4.4. MODELO “QUESTION MARK”

Esta geometría ha estado inspirada por uno de los modelos de elemento distribuidor mostrados en el *capítulo 2*, el cual se basa en modificar la parte del codo para que gire más de 90 grados tomando una forma parecida a la de un sifón.

Además, también se ha creído conveniente su análisis ya que tras los resultados obtenidos de la geometría de referencia, se comprobó que el codo recto era el causante de la aparición del flujo principal que posteriormente debería ser dispersado por el tramo con ondulaciones. De este modo, se ha pensado que si el flujo principal no se formara tan intensamente, el tramo con ondulaciones no tendría tantas dificultades para la uniformización del flujo.

La forma de referirse a esta nueva geometría es con el alias de “Question Mark”, ya que la forma resultante de las modificaciones en el codo es bastante parecida a la de un interrogante al revés.

4.4.1. Geometría

Tal y como se ha dicho, esta geometría se ha centrado en la modificación del tramo del codo para pasar de la dirección horizontal a la vertical. Como se puede ver en la *figura 59*, se ha conservado el mismo radio de giro que el usado en la geometría de referencia, solamente se ha alargado hasta completar casi media circunferencia; donde se ha unido con otro codo con menor radio para juntarlo con el elemento vertical. Para encajar las mismas dimensiones de las secciones que en la geometría de referencia, en el primer tramo del elemento vertical se produce un ensanchamiento.

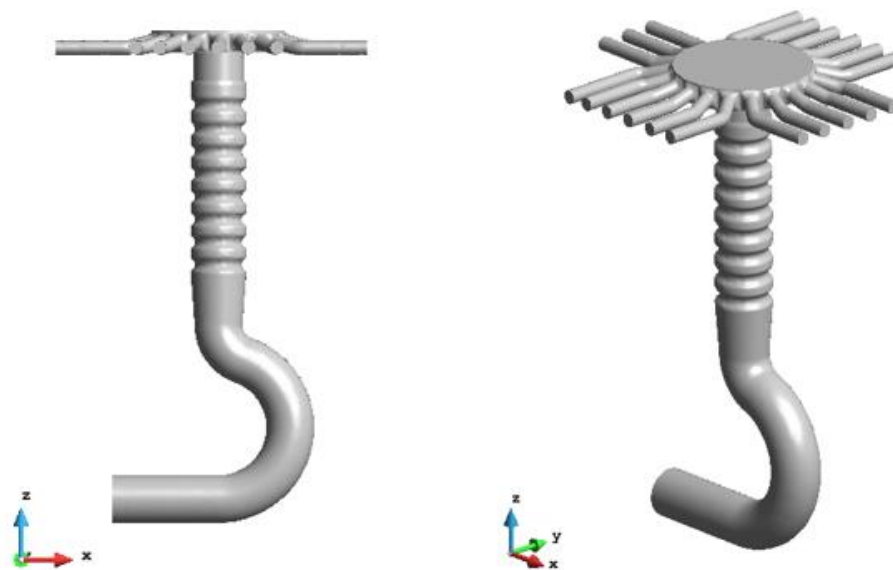


Figura 59. Geometría del modelo “Question Mark”.

4.4.2. Resultados

4.4.2.1. Determinación estado estacionario

En la *figura 60* se pueden ver las distribuciones de velocidades de la sección más característica para diferentes instantes de tiempo, las cuales se usaran para conocer la estacionalidad del flujo en el elemento.

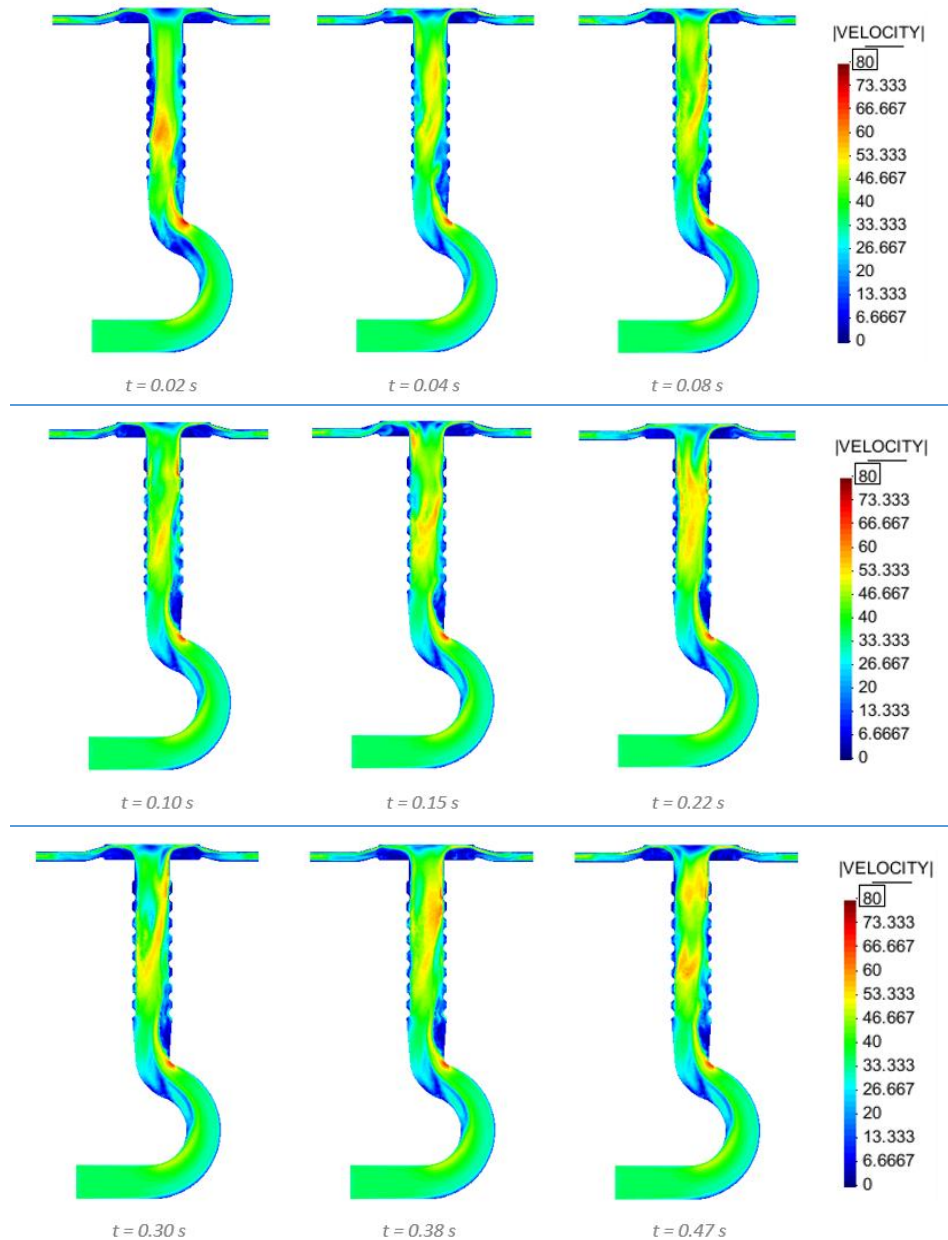


Figura 60. Distribución velocidades en la sección principal representativa. Modelo "Question mark".

En esta geometría se observa una estabilización del flujo solamente en la mitad inferior del elemento, es decir, hasta la entrada del tramo con ondulaciones. En este caso, al no tratarse de un codo de 90 grados como sucedía en las otras geometrías, no se crea una corriente principal

vertical bien definida en la salida del codo; sino que la forma de sifón parece minorar el efecto visto anteriormente del codo.

En cambio, a partir del tramo con ondulaciones la distribución de velocidades empieza a cambiar con los distintos instantes de tiempo debido a las turbulencias generadas en este. No obstante, esta variación se produce como si de ráfagas de aire se tratara, teniendo instantes con valores más elevados de velocidades que otros. Además, de forma general se observa una menor diferencia entre velocidades en el conducto vertical, dando la sensación de una mejor dispersión.

Este fenómeno de la aparición de ráfagas en el tramo vertical puede ocasionar variaciones en el cabezal superior, por lo que en la *figura 61* se muestra la distribución de velocidades en el interior de este para los mismos instantes de tiempo.

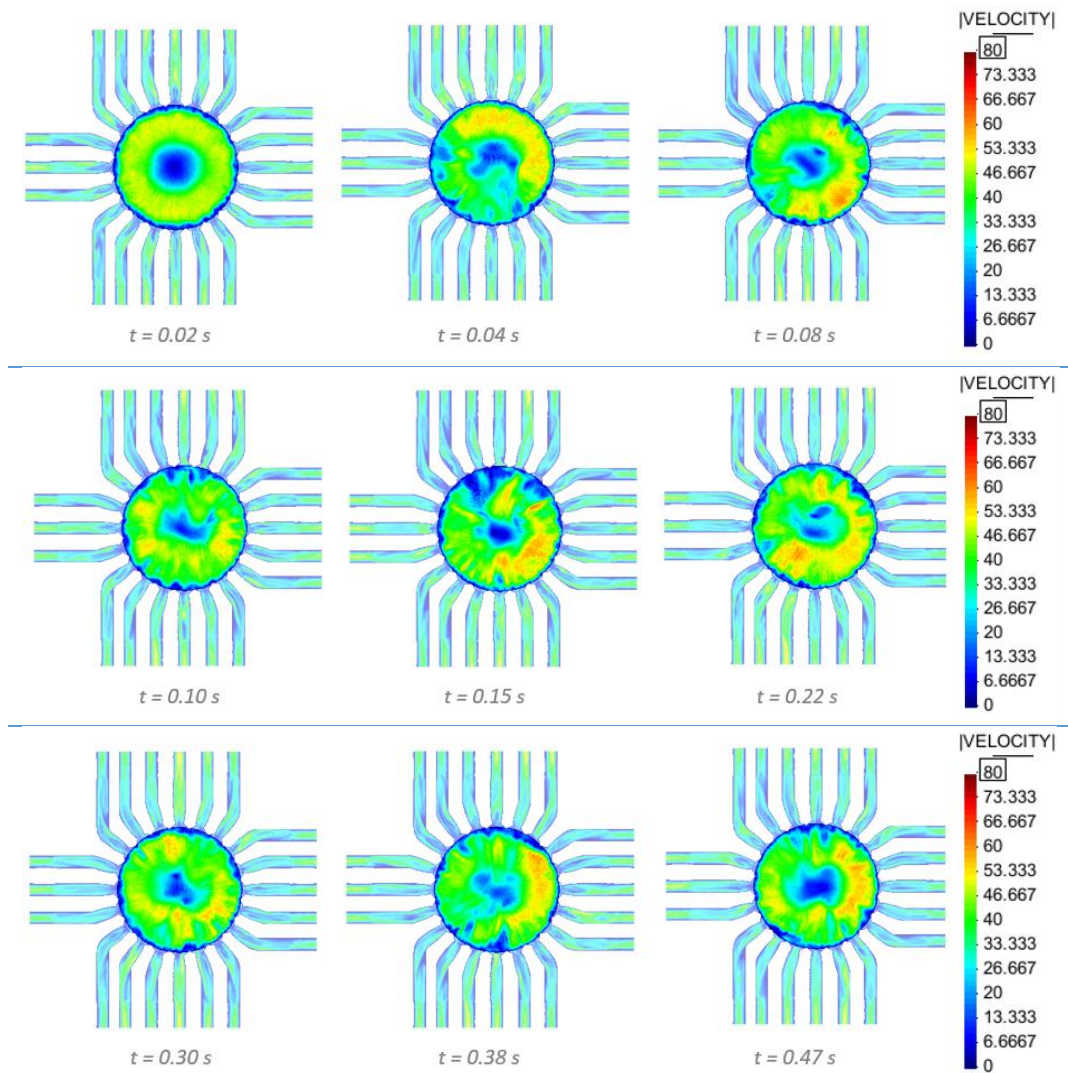


Figura 61. Distribución de velocidades en el cabezal superior. Modelo "Question Mark".

Mediante estos cortes se observa que en el cabezal circular se producen variaciones en el tiempo; mostrando una distribución bastante uniforme en toda la sección pero con la aparición de zonas con velocidades más elevadas por todo el perímetro, principalmente en la parte posterior del elemento. También se forman pequeñas zonas de velocidades bajas.

4.4.2.2. Análisis de velocidades

A continuación se analiza la distribución de velocidades del elemento en el instante $t=0.30s$, de forma global a partir de los cortes verticales principales, y de forma seccional con los cortes transversales a lo largo del elemento. Permitiendo así el conocimiento más detallado del comportamiento del flujo en el interior del elemento.

Global

Mediante la *figura 62* se puede observar que en la entrada al codo se forma una corriente principal en la parte superior, manteniéndose pegada en la parte interior del giro hasta recorrer el primer tramo del codo, como sucedía en la geometría de referencia. No obstante, al seguir por el segundo tramo del giro (con el mismo radio), el flujo intenta buscar la máxima verticalidad separándose de la parte interior hasta llegar a la exterior, donde se produce la máxima velocidad. De este modo, se crean zonas de velocidades muy bajas en la parte interior del segundo tramo de giro, es decir, en la unión del codo con el tramo vertical.

También se observan zonas con turbulencias en la parte posterior del elemento del tramo vertical antes de las ondulaciones, producidas por el efecto del codo.

Al llegar al tramo con ondulaciones, la corriente principal se dispersa pasando a ocupar mayor parte de la sección. No obstante, se mantienen algunos tramos con velocidades superiores que tienden a ascender hacia el cabezal circular.

El comportamiento general del fluido en la entrada del cabezal es muy similar a las otras geometrías, variando las distribuciones de velocidades en su interior dependiendo de las de entrada en cada instante.

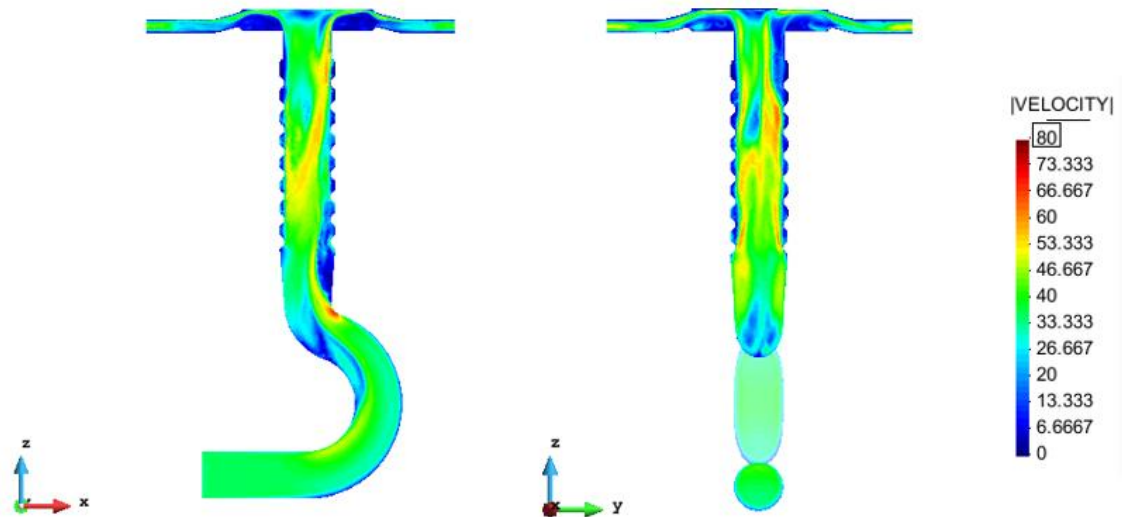


Figura 62. Distribución de velocidades en secciones verticales principales. Modelo "Question Mark".

Seccional

En la figura 63 se muestran las diferentes secciones transversales escogidas para el análisis del comportamiento del flujo.

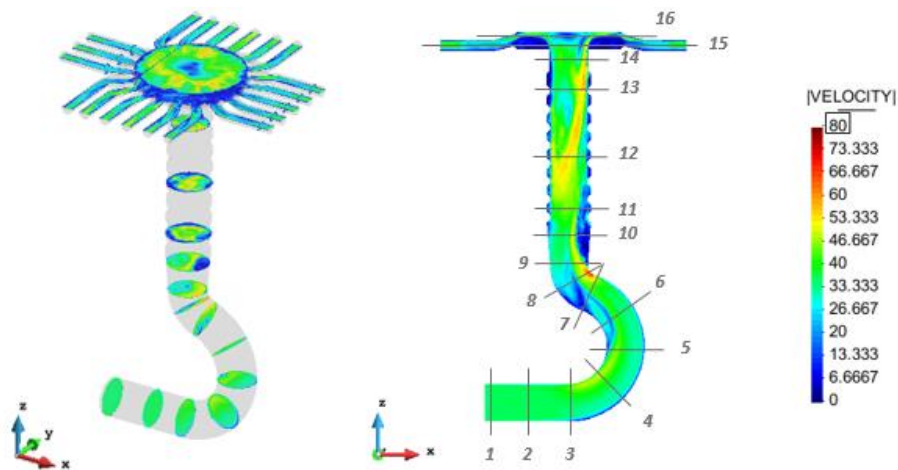


Figura 63. Esquema de secciones transversales para el análisis. Modelo "Question mark".

Se ha dividido el elemento en dos partes para un análisis más entendible de las secciones.

En la figura 64 se pueden observar las secciones de la primera mitad del elemento, abarcando desde la sección de entrada hasta la sección final del codo, las cuales corresponden a la parte más estacionaria del fluido.

Se comprueba que hasta el primer tramo del codo (giro inicial de 90°), la distribución es muy similar a la obtenida en los casos anteriores. No obstante, al seguir girando, se van formando zonas de turbulencias en la parte interna del codo que se van desplazando hacia la parte central

de la sección; mientras que la corriente principal se va moviendo hacia la parte posterior del elemento llegando a sus valores máximos.

Este fenómeno provoca una distribución de velocidades en la salida del codo en forma de media luna con valores elevados, dejando la parte frontal de la sección con una zona de velocidades medias-bajas.

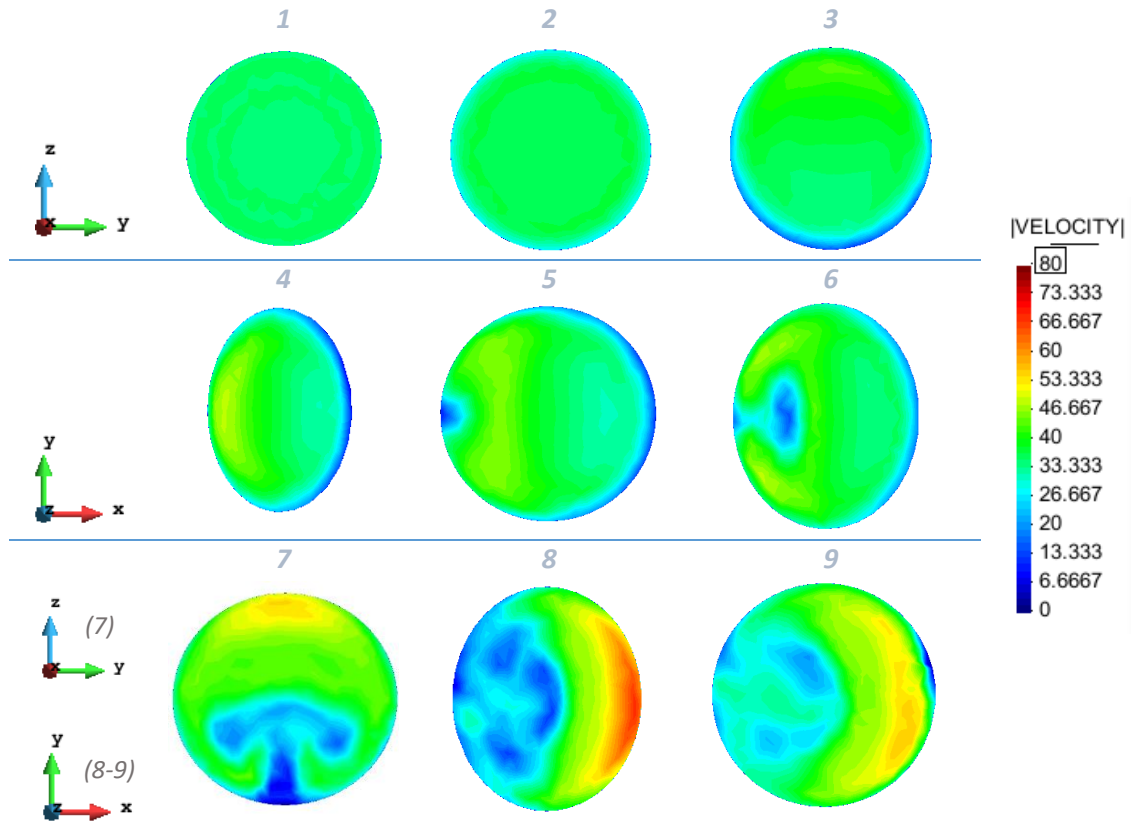


Figura 64. Distribución velocidades en secciones transversales mitad inferior. Modelo "Question Mark".

Las secciones correspondientes a la segunda mitad del elemento se muestran en la figura 65.

Antes de la entrada al tramo de ondulaciones se encuentra un primer tramo con un pequeño ensanchamiento de la sección, donde se forma una zona considerable de turbulencias en la parte posterior del elemento.

Seguidamente, se puede observar una variación en las distribuciones de velocidades de las diferentes secciones transversales a lo largo del conducto vertical con ondulaciones. Partiendo de una distribución bastante simétrica y uniforme de velocidades, debido a las turbulencias generadas por la geometría en este tramo, esta va cambiando hasta llegar a la de salida con valores elevados en la pared posterior del elemento y unas pequeñas zonas de turbulencia en las paredes laterales.

Finalmente, se puede ver que en la entrada del cabezal la distribución en la sección es bastante uniforme, exceptuando pequeñas zonas con velocidades un poco más elevadas y algunas de turbulencia. Por lo tanto, en la parte superior del cabezal se obtienen también unas velocidades bastante homogéneas en toda la sección, exceptuando las zonas donde aparecen valores mayores que se corresponden con las de la entrada.

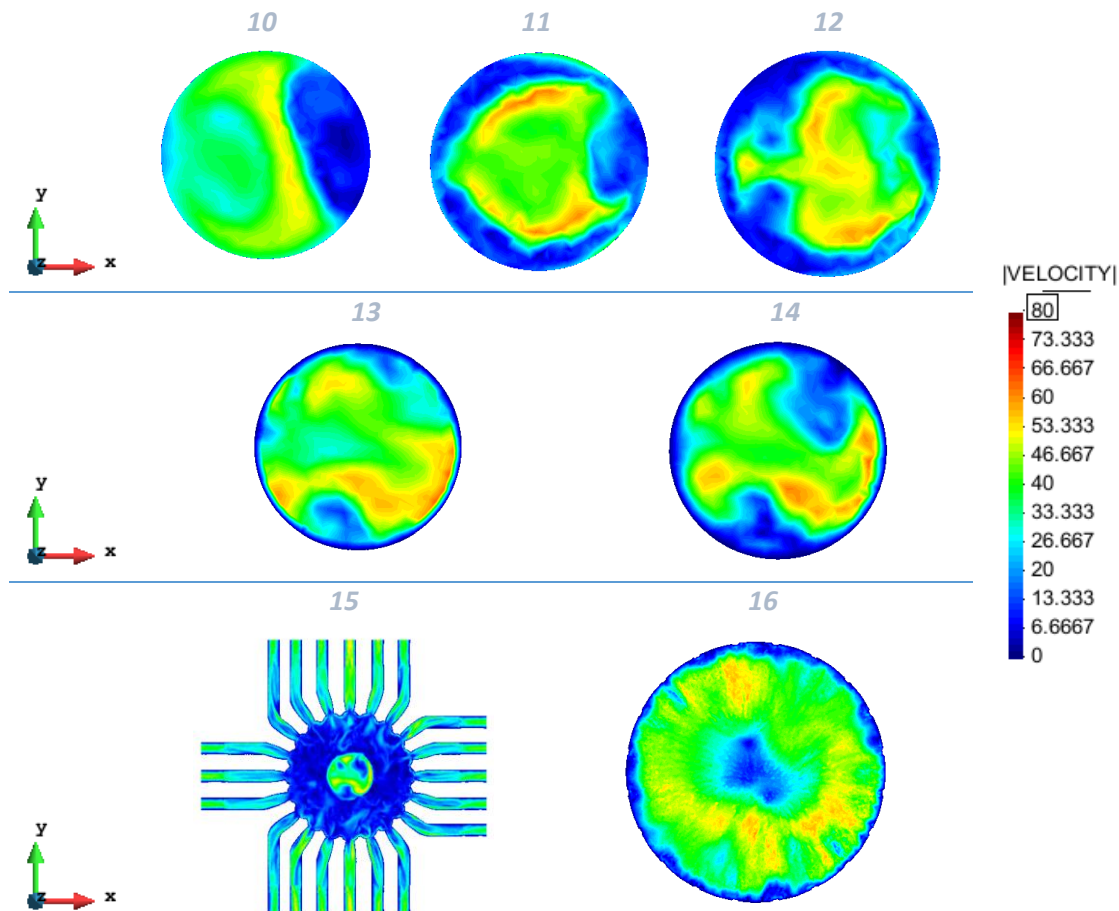


Figura 65. Distribución de velocidades en secciones transversales mitad superior. Modelo "Question mark".

4.4.3. Conclusiones

Del análisis realizado para la geometría "Question Mark", se puede concluir que los resultados obtenidos son un tanto satisfactorios.

Al no llegar a un estado estacionario del flujo en todo el elemento, se produce una variación constante de velocidades en la parte superior del cabezal con el paso del tiempo. No obstante, la distribución de velocidades obtenida en el cabezal es bastante uniforme en toda la sección pero con cada instante de tiempo aparecen distintas zonas con velocidades superiores.

De esta forma, al no haber grandes variaciones en el tiempo, podría darse el caso que al hacer la simulación con las partículas estas salieran de forma más o menos uniforme por las mangueras

de escape, con una mayor afluencia en las posteriores (de forma contraria al caso de referencia), ya que es la parte donde se localizan mayoritariamente las velocidades más elevadas.

Respecto a la geometría modificada en este modelo, es decir, al alargamiento del codo dándole forma de interrogante, se ha comprobado que este ayuda a la dispersión del flujo en su llegada al tramo vertical; evitando así la presencia de una corriente principal en todo el elemento, como sucede en el caso de referencia. No obstante, también es el culpable de la aparición de las zonas turbulentas en la parte interior del codo y en su unión con el tramo vertical.

Traducido al comportamiento de las partículas se puede intuir que no se ha producido mucha mejora en la parte inferior del elemento, ya que al aparecer zonas con velocidades bajas, las partículas seguirán siendo susceptibles al desvío de su trayectoria principal, generando zonas de descenso y posibles acumulaciones de semillas.

4.5. CONCLUSIONES

Una vez realizado el análisis detallado del comportamiento del fluido en el interior de las diferentes geometrías modificadas mostradas en el presente capítulo, se ha podido probar la existencia de otras geometrías capaces de conseguir una distribución de velocidades más homogénea en el cabezal superior respecto a la de referencia. Fenómeno que, a priori, también proporcionará una repartición más equitativa de las semillas en las mangueras de salida.

Por un lado, se ha podido observar la formación, en los primeros instantes de tiempo, de un estado estacionario en la mitad inferior del elemento para los tres modelos estudiados; mientras que en la mitad superior, el flujo va variando con el paso de tiempo. No obstante, esta variación no es tan notoria en el modelo “Mongeta” ya que se mantiene una corriente principal fija en la parte posterior del conducto vertical y solamente se producen cambios en la parte frontal de este. En cambio, en los modelos “Michelin” y “Question Mark”, se produce más variación en el tiempo respecto a la distribución de velocidades, pero a su vez con una mayor uniformización en los valores de la sección, como si de rachas de aire se trataran.

De este modo, en el cabezal circular del elemento se crea una distribución de velocidades completamente caótica en el caso de “Mongeta”, con la aparición considerable de zonas turbulentas en la parte superior de este; mientras que en los otros dos modelos la resultante es muy similar, partiendo de una base bastante uniforme y con la aparición de velocidades más elevadas en diferentes zonas que van girando con el paso del tiempo alrededor del perímetro.

Por otro lado, como se ha probado anteriormente, para el correcto movimiento de las partículas es recomendable no disponer de zonas con velocidades bajas para evitar la decaída y acumulación de estas. De este modo, el modelo con un mayor logro en este ámbito corresponde al de “Michelin”, formándose solamente una pequeña zona en la parte interior de salida del codo; seguido por el modelo “Mongeta” y por último el “Question Mark”.

CAPÍTULO 5:

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1. CONCLUSIONES

Se puede decir que gracias al software del GiD y a la potencia y versatilidad que tienen actualmente las simulaciones numéricas, en concreto los métodos CFD y DEM, se ha sido capaz de obtener un conocimiento muy profundo de la dinámica producida en el interior del elemento; descubriendo así, cómo se comporta la mezcla de la corriente de aire con las partículas en su paso por los distintos tramos y secciones del elemento.

Además, la información obtenida en la simulación es muy relevante y a priori desconocida, ya que durante el proceso de fabricación y en su posterior uso no se tiene acceso a su interior, haciendo imposible un análisis tan detallado como el que ha permitido el uso de esta tipología de softwares.

Al proporcionar este nivel de conocimiento y poder relacionar las trayectorias de las partículas con la distribución de flujo, ha sido posible probar diferentes alternativas a la geometría que actualmente es fabricada por una marca comercial, con la intención de homogeneizar la salida de partículas para todas las mangueras del cabezal. Para la creación de las nuevas geometrías a testar solamente se ha modificado la forma del conducto, manteniendo el mismo cabezal distribuidor en todos los casos. A pesar de que todos los resultados obtenidos no han sido favorables, igualmente han servido para entender mejor el comportamiento del flujo.

A partir de las simulaciones con nuevas geometrías que se han podido realizar, se concluye que con la que se obtiene una mejor distribución del fluido, y por lo tanto, probablemente también de las semillas (evitando zonas de acumulación y decaída de partículas), corresponde al modelo “Michelin”. Comprobando así, la gran capacidad de uniformización de velocidades que proporciona el efecto de las ondulaciones del conducto vertical.

5.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El objetivo del estudio realizado es el de dar un paso más para poder llegar a encontrar el elemento distribuidor para máquinas de siembra neumáticas capaz de repartir de forma uniforme las semillas por las diferentes mangueras de salida.

A continuación se introducen algunas ideas que se deberían tener en cuenta de cara a futuras investigaciones sobre el problema en cuestión:

- Mejorar la geometría de algunos de los modelos analizados intentando evitar la aparición de zonas con velocidades muy bajas. Algunas modificaciones podrían ser las siguientes:
 - “Michelin”: Alargar el tramo con ondulaciones de forma que empezara justo a la salida del codo.
 - “Mongeta”: Evitar los cambios bruscos entre secciones, haciendo las transiciones entre ellas más suaves.
 - “Question Mark”: Modificar los radios y longitudes de giro en el codo, haciendo más suave la unión con el tramo vertical.
- Crear nuevas geometrías con la combinación de los modelos ya analizados, pudiendo utilizar las mejores partes de cada una, buscando una distribución lo más uniforme posible en el cabezal superior.
 - Se podría probar de combinar el modelo “Mongeta” o el de “Question Mark” con el de “Michelin”, añadiendo las ondulaciones del último en las partes características de los otros dos.
 - Modificar la sección del conducto desde la salida del primer tramo de giro hasta llegar al tramo con ondulaciones vertical del modelo “Question Mark”, con una sección similar a la zona característica del modelo “Mongeta”. Intentando evitar las posibles zonas de acumulación de partículas.
- Lanzar las simulaciones incluyendo las partículas para las geometrías modificadas y medir el caudal de semillas para cada una de ellas. Conocer las características del flujo interior nos permite estimar la homogeneidad de la distribución, pero el cálculo de la dinámica de las semillas nos daría un resultado más fiable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bayati, M., & Johnston, C. CFD-DEM Investigation of Seed Clustering in an Air Seeder with the Immersed Boundary Method. Grande Prairie.
- [2] Bourges, G., Eliach, J., & Medina, M. (2017). Numerical Evaluation of a Seed Distributor Head for Air Seeders. The Italian Association Of Chemical Engineering, 58.
- [3] Cantero, M., Bertolino, G., & Storti, M. (2014). Comparación entre resultados experimentales y numéricos en un cabezal distribuidor de sembradora "Air Drill". Asociación Argentina De Mecánica Computacional, XXXIII, 2555-2563.
- [4] Cartwright, J., Feudel, U., Károlyi, G., de Moura, A., Piro, O., & Tél, T. (2010). Dynamics of Finite-Size Particles in Chaotic Fluid Flows. Understanding Complex Systems, 51-87. doi: 10.1007/978-3-642-04629-2_4
- [5] El-Beheri, S., Hamed, M., Ibrahim, K., & El-Kadi, M. (2010). CFD Evaluation of Solid Particles Erosion in Curved Ducts. Journal Of Fluids Engineering, 132(7). doi: 10.1115/1.4001968
- [6] Idelsohn, S., Oñate, E., & Becker, P. (2017). Particle methods in Computational Fluid Dynamics. Centre Internacional De Mètodes Numèrics En Enginyeria - CIMNE.

- [7] Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., Amberger, S., & Pirker, S. (2012). Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. *All CD-Laboratory On Particulate Flow Modelling*, 12(2/3), 140-152.

- [8] Lijing, L., Hui, Y., & Shaochun, M. (2016). Experimental study on performance of pneumatic seeding system. *Int J Agric & Biol Eng*, 9(6), 84-90.

- [9] Maxey, M. (1983). Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow. *Physics Of Fluids*, 26(4), 883. doi: 10.1063/1.864230

- [10] Yatskul, A., Lemière, J., & Cointault, F. (2017). Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder. *Biosystems Engineering*, 120-134.